POUR LA SCIENCE

édition française de
SCIENTIFIC AMERICAN

3861

FÉVRIER 1990 – MENSUEL N° 148
BELGIQUE : 212 FB SUISSE : 9 FS CANADA : $ 5,75 (14321) MAROC : 28 DH

- LES OISEAUX DE PARADIS
- L'HISTOIRE DES TROUS NOIRS
- PREMIÈRES PHOTOGRAPHIES EN COULEURS
- LES AGRÉGATS
- LES CONNEXIONS DANS LE CERVEAU

M 2687 - 148 - 29,00 F
3792687029005 01480

POUR LA SCIENCE
édition française de SCIENTIFIC AMERICAN

ACTUALITÉS

4 TRIBUNE DES LECTEURS

■ Techniques de sondage ■ Les feux de brousse ■ Antidarwinisme

5 POINT DE VUE

■ J.-D. Puyt : La somatotropine bovine et la sécurité du consommateur

6 PROFESSION SCIENTIFIQUE

■ Lucienne Gouguenheim

8 PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

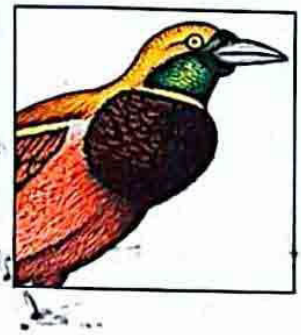
■ Un canal sans eau ? ■ Un nouveau récepteur de l'adrénaline ■ Récifs et glace ■ La Grèce, terre de nos ancêtres ? ■ Gélatine et percolation ■ Bactéries résistantes ■ Entre Ptolémée et Copernic ■ Un cœlacanthe en aquarium ■ Hybrides pièges ■ Grains de céramiques ■ Les champs dans les grains ■ Épouillage et génétique ■ Examen d'une protéine ■ La Grande Muraille du cosmos ■ La faim justifie les moyens ■ Pesticides et environnement.

28 SCIENCE ET INDUSTRIE

■ Un dictionnaire informatique des synonymes ■ Diagnostic immunitaire ■ Synthèse sans solvant ■ Un stylo à ADN ■ Le microscope confocal ■ L'ordinateur copilote

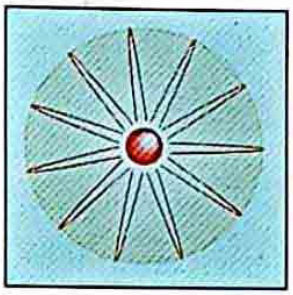
36 PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

■ 100 ans : les étoiles doubles spectroscopiques ■ 50 ans : Vers la bombe atomique



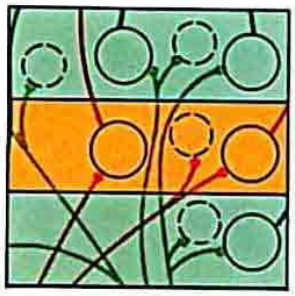
38 Les oiseaux de Paradis
Bruce Beehler

Les comportements sociaux et sexuels de ces oiseaux tropicaux dépendent notamment de leur régime alimentaire : en raison de leur alimentation particulière, certaines espèces sont monogames, tandis que d'autres s'accouplent très librement.



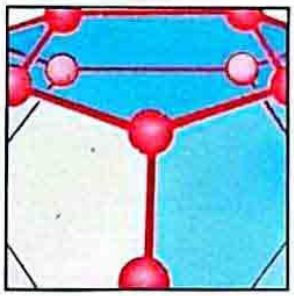
46 La préhistoire des trous noirs
Jean Eisenstaedt

Les corps obscurs, précurseurs newtoniens des trous noirs, ont été conçus dès la fin du XVIII^e siècle dans le cadre de la théorie de la gravitation universelle.



56 La formation des synapses dans le cerveau
Ronald Kalil

Lorsque le cerveau d'un jeune animal se développe, les circuits neuronaux se modifient en fonction de l'environnement et de l'activité de l'animal ; de nouvelles connexions s'établissent.



64 La matière divisée : les petits agrégats
Michael Duncan et Dennis Rouvray

Les petits agrégats de quelques centaines d'atomes au plus constituent un état particulier de la matière. Leur réactivité et leur sélectivité chimiques en font des intermédiaires utiles en catalyse, en optique ou en électronique.

© Pour la Science S.A.R.L.
Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays.
La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. »
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage (la présente publication) sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français du Copyright (6 *bis*, rue Gabriel Laumain – 75010 Paris).

Nos lecteurs trouveront en pages 34A, 34B, 98A et 98B des bulletins d'abonnement.

Publié avec le concours du Centre national des lettres.

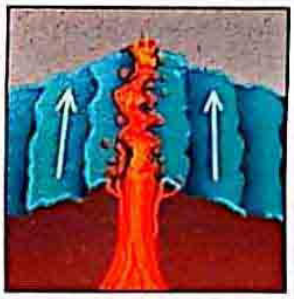
PUBLICITÉ France : Chef de publicité : Susan Mackie, assistée de Léa Cottin, 8, rue Férou 75006 Paris
Tél. (1) 46.34.21.42. Telex : LIBELIN 202978 F. Télécopieur : 43.25.18.29
Étranger : Robert Gregory, 415 Madison Avenue, New York. N. Y. 10017 – Tél. (212) 754.02.62
SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP Henri Gibelin – 8, rue Férou, 75006 Paris – Tél. : (1) 46.34.21.42
DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE
Belgique : Solibel-Belin – 24, rue Vilain 14, 1050 Bruxelles.
Canada : Modulo – 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H4 Canada.
Suisse : GM Diffusion – 27, chemin du Grand-Mont, 1052 Le Mont-sur-Lausanne
Autres Pays : Éditions Belin – B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.
OJD DIFFUSION PRESSE 1988
Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. » 8 rue Férou, 75006 Paris.

N° 148
Février 1990

3861

72 **Les premières photographies en couleurs**
Grant Romer et Jeannette Delamoir

Les premiers procédés de reproduction d'images en couleurs étaient compliqués, mais ingénieux.



82 **L'évolution du champ magnétique terrestre**
Jeremy Bloxham et David Gubbins

En détectant l'activité magnétique à la surface du Globe, on détermine les mouvements du fer en fusion qui s'écoule dans la partie externe du noyau terrestre et engendre le champ magnétique terrestre.

90 **Les téléopérateurs**
William Uttal

Ces machines télécommandées travaillent dans des environnements peu accessibles ou hostiles.

96 **Les mystères de Mithra**
David Ulansey

Les images de cet ancien culte méditerranéen symbolisent un phénomène astronomique ; le dieu Mithra aurait gouverné les cieux et réglé la destinée de l'Homme.

128 AUTEURS ET BIBLIOGRAPHIE

ACTIVITÉS

106 VISIONS MATHÉMATIQUES

■ Ian Stewart D'où a été prise la photo ?

112 L'EXPÉRIENCE DU MOIS

■ Jearl Walker Ascension de l'air

116 CRÉATIONS INFORMATIQUES

■ A. Dewdney Esprit, es-tu là ?

120 ANALYSES DE LIVRES

■ Jérôme Rammuni, La physique du calcul (Jean Largeault) ■ Marcel Lecoufle, Comment choisir et cultiver vos plantes carnivores (Marcel Bournérias) ■ Kevin Kelley, Clairs de Terre (Hervé de Brialmont) ■ Jean-Guy Michard, Le monde perdu des dinosaures (Eric Buffeteaut) ■ Marie-Germaine Bousser et Hélène Massiou, La migraine (Jean-Denis Degos) ■ François Merlet, L'ours, seigneur des Pyrénées (Bernard Richard).

COUVERTURE

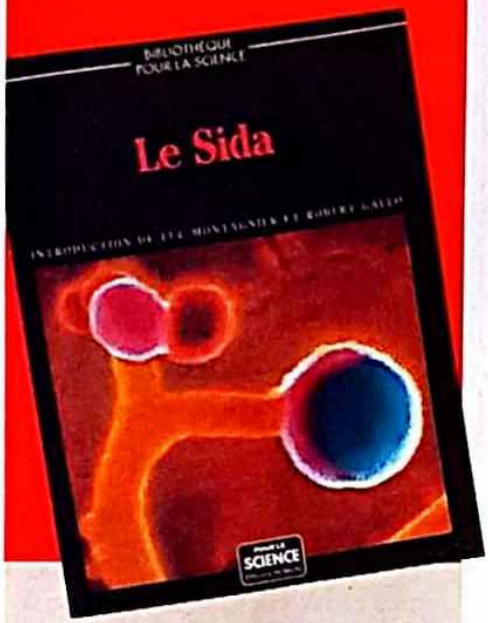
L'illustration de couverture représente deux oiseaux de Paradis de l'espèce *Paradisaea raggiana,* qui vit dans la jungle de Nouvelle-Guinée. Dans cette espèce, les mâles et les femelles sont très différents (voir *Les oiseaux de Paradis,* par Bruce Beehler, page 38). Les mâles ont des comportements de parade complexes : ils se perchent sur une branche, au-dessus d'une femelle, se mettent la tête et les ailes en bas, et présentent leurs superbes plumes orangées.

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti, Michel Zelvelder, Florence Rosier. Secrétariat : Annie Tacquenet, Pascale Thiollier. Direction marketing et publicité : Henri Gibelin, assisté de Monique Pouzol. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, Véronique Celton. Directeur de la publication : Max Brossollet.
Ont également collaboré à ce numéro : Pascale Aubrun, Chantal Boyer, Catherine Brechignac, Alain Brunet, Philippe Coiffet, Paul Decaix, M. Dennilauler, François Gallet, Rémy Gantès, Claire Gaston, Thierry Hermeline, Evelyne Host-Platret, Jean-Louis Le Mouel, Christian Moreau, Jean-Philippe Nordmann, Bernard Pire, Pascale This, Robert Turcan, M. Voisin.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : Jonathan Piel. Board of editors : Armand Schwab (Managing Editor), Timothy Appenzeller, Laurie Burnham (Associate Editors), Timothy Beardsley, Elizabeth Corcoran, John Horgan, June Kinoshita, Philip Morrison (Book Editor), Corey Powell, John Rennie, Philip Ross, Ricki Rusting, Russell Ruthen, Paul Wallich, Karen Wright. President of Magazine Division and Publisher : John Moeling. President and Chief Executive Officer : Claus-Gerhard Firchow. Executive Committee : Claus-Gerhard Firchow, Vincent Barger, Linda Chaput, Jonathan Piel, Carol Snow. Chairman of the Board : Georg-Dieter von Holtzbrinck. Chairman Emeritus : Gerard Piel.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

BIBLIOTHEQUE POUR LA SCIENCE



LE SIDA

Ce livre établit le bilan des recherches scientifiques sur le virus du SIDA, l'un des plus complexes et déconcertants des organismes vivants, sur son dépistage, sur les possibilités de vaccin et de médicament, sur l'épidémiologie et les dimensions sociales du SIDA.

SOMMAIRE
1. Le SIDA aujourd'hui
2. La génétique du virus du SIDA
3. Les origines du virus du SIDA
4. L'épidémiologie du SIDA aux États-Unis
5. Le SIDA dans le monde
6. Les manifestations cliniques du SIDA
7. Le virus du SIDA et ses cibles
8. La détection du virus du SIDA
9. Les traitements du SIDA
10. Les vaccins contre le SIDA
11. Les dimensions sociales du SIDA

POUR LA SCIENCE DIFFUSION BELIN

Bon de commande page 98 A

Techniques de sondage

J'ai lu avec intérêt votre commentaire sur un sondage concernant la procréation dans le numéro de décembre de *Pour la Science*. Bien que la revue n'indique pas si vous êtes impliqué dans ce sondage, j'éprouve le besoin de vous communiquer les remarques personnelles suivantes.

1. Il arrive souvent que l'on hésite à répondre à une question, non que l'on se sente incapable d'y répondre, mais parce que la question peut être comprise de deux façons, l'une appelant une réponse positive et l'autre une réponse négative. Ainsi, pour la question concernant l'information de l'enfant, il faut garder à l'esprit que ce mot a deux significations distinctes. On est un enfant si l'on appartient à une certaine tranche d'âge. Mais je reste l'enfant de mes parents quel que soit mon âge. Le problème du droit à l'information concerne-t-il les droits de l'enfant ou simplement les droits de l'homme ?

2. L'analyse d'un sondage doit tenir compte de la prise de conscience de certains aspects du problème par les sondés. Je suis toujours frappé par le fait que les sondages posent rarement des questions sur les arguments qui conduisent les sondés à faire telle ou telle réponse. Cela m'amène au point suivant. Dans le cas d'une insémination artificielle, il y a deux aspects que vous n'évoquez pas. Le premier concerne la possibilité d'union d'un homme (d'une femme) avec sa demi-sœur (son demi-frère). Le second, le fait que l'enfant sait que sa mère a décidé de ne pas choisir le père de son enfant. Pour ces deux raisons, le sondage aurait dû être complété par les questions suivantes :

– Si vous étiez né par insémination artificielle anonyme, ne craindriez-vous pas une union accidentelle avec votre demi-sœur ou demi-frère ?

– Si vous étiez né par insémination artificielle anonyme, auriez-vous du ressentiment envers votre mère coupable de ne pas avoir choisi le père de son enfant ?

Le problème des procréations artificielles est toujours présenté comme s'il n'intéressait que les parents. Il serait peut-être bon de savoir ce qu'en penseraient les intéressés. Il suffit de connaître les questions difficiles que se posent déjà les enfants adoptés pour deviner celles que ne manqueront pas de se poser ceux nés d'une insémination artificielle ou d'une mère porteuse. Je demeure persuadé qu'un sondage accompagné de ces questions (et d'autres du même type) changeraient considérablement l'interprétation des réponses.

Henri BACRY
Professeur de physique
Université d'Aix-Marseille II.

Les feux de brousse

J'ai lu dans le numéro 146 de *Pour la Science*, l'article sur le monoxyde de carbone dans l'atmosphère. Je travaille dans un pays de 620 000 kilomètres carrés dont 400 000 kilomètres carrés sont traversés chaque année par les feux courants (entre novembre-décembre et avril). Il faut bien distinguer les forêts denses petit à petit grignotées mais imperméables aux feux et les savanes (herbeuses, arbustives ou arborées) qui sont brûlées chaque année pendant la saison sèche.

L'expérience faite en octobre (mois très pluvieux à Bangui) devrait être répétée plus tard, pour étudier la liaison entre la teneur de CO et les feux au Nord de l'équateur. L'expérience devrait être couplée avec des images-satellites SPOT ou *Landsat* où les « feux de brousse » se lisent très facilement dans le proche infrarouge.

Ces feux sont une tradition africaine dont cet aspect de la nocivité n'avait pas été souligné à ce jour.

Yves BOULVERT
Directeur du Centre ORSTOM en Centrafrique

Antidarwinisme

Dans votre excellente critique du livre : *L'horloger aveugle,* l'auteur dit qu'il y a encore (!) des antidarwinistes.

Le meilleur argument que pourraient avoir les antidarwinistes est qu'ils existent encore, malgré des millions d'années d'Évolution de l'Espèce humaine !

Edmond BRUNEAU
Ingénieur civil de l'ENPP

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

J.-D. Puyt

La somatotropine bovine et la sécurité du consommateur.

Le progrès des biotechnologies permet de fabriquer en quantité des peptides et d'envisager leur utilisation en production animale ; le premier peptide qui devrait ainsi être prochainement introduit en élevage est la somatotropine ou BST *(bovine somatotropine)*. Cette substance, qui augmente la sécrétion de lait, permettrait de mieux adapter la production laitière au besoin du marché (dans le cadre des quotas). Mais déjà, avant même son introduction, la molécule suscite des controverses. Le lait conservera-t-il ses qualités naturelles ? Restera-t-il inoffensif pour la santé du consommateur ? Par ailleurs, la BST n'est autre que l'hormone de croissance ; or, bien qu'elle soit tout à fait différente des hormones stéroïdiques sexuelles (anabolisants), on connaît la connotation négative du mot « hormone » et les confusions entretenues lors de la querelle du veau « aux hormones ». Enfin, dans le contexte des quotas, certains s'interrogent sur l'intérêt d'une molécule qui accroîtrait la production de lait.

Ces interrogations sont-elles fondées ? Il me semble important d'y répondre scientifiquement en faisant abstraction de considérations émotionnelles excessives ou injustifiées.

L'autorisation administrative de mise sur le marché semble retardée par des considérations politiques. En revanche le dossier scientifique est prêt et en discussion au Comité des médicaments européens. Les firmes pharmaceutiques qui envisagent la commercialisation de la BST sont en effet tenues, comme pour tout nouveau médicament, d'apporter des garanties. La BST est une substance naturelle sécrétée par l'hypophyse et présente à l'état de traces normales dans le lait avec de très nombreuses autres hormones. Lorsque l'on compare les concentrations de BST dans le lait de vaches supplémentées en BST, à celles de vaches témoins, on découvre que les teneurs résiduelles sont similaires, de l'ordre du nanogramme par millilitre (l'équivalent de la concentration en sucre consécutive à la dissolution d'un morceau de sucre dans un million de litres de lait) ; aussi les administrations anglaises et américaines, notamment la FDA *(Food & Drug Administration)*, l'une des administrations les plus sévères au monde en matière de sécurité, ont-elles autorisé la commercialisation du lait de vaches supplémentées expérimentalement en BST.

En second lieu, la BST est un polypeptide formé de 191 acides aminés : comme tous les polypeptides, il est dégradé dans le tube digestif sous l'action des enzymes protéolytiques. Les produits de dégradation (métabolites) sont dénués d'activité biologique et donc totalement inoffensifs. Cette particularité est une garantie supplémentaire pour la santé du consommateur au cas où les niveaux résiduels dépasseraient les seuils physiologiques (cette dégradation est révélée par le lourd handicap que doivent accepter les diabétiques insulino-dépendants obligés de recevoir plusieurs injections quotidiennes d'insuline, un autre polypeptide).

Si la BST n'était pas détruite par voie orale, elle serait de toute façon inactive. En effet, la séquence des acides aminés qui composent la chaîne de BST, comme celle de toutes les protéines animales, est codée génétiquement et donc spécifique de l'espèce animale. Aussi la somatotropine bovine est très nettement différente des somatotropines porcine ou encore humaine : pour agir, ces somatotropines doivent se fixer sur des récepteurs très spécifiques qu'elles viennent activer. Les différences structurales font que la somatotropine bovine est reconnue par les récepteurs présents chez les bovins mais pas par ceux de l'Homme : aussi la somatotropine bovine est-elle dénuée de toute activité et, *ipso facto*, de toute toxicité pour l'Homme, y compris par voie injectable (cette inactivité explique les tentatives infructueuses de traitement du nanisme hypophysaire chez l'enfant, dans les années 1950, par la somatotropine bovine). Il en est de même de ses métabolites formés dans le tube digestif qui ne peuvent être reconnus et sont donc obligatoirement dénués de toute activité biologique et de toute toxicité.

Les somatotropines bovines recombinées sont quasiment identiques à la somatotropine bovine naturelle d'origine hypophysaire : elles n'en diffèrent, selon les procédés de fabrication, que par l'ajout de un à neuf acides aminés terminaux. On a vérifié que ces différences ne modifiaient pas l'activité ou l'innocuité de la somatotropine naturelle.

Par ailleurs, la BST stimule la production de certains facteurs de croissance périphériques tissulaires, les somatomédines, notamment l'IGF-I (ou *Insuline-Like Growth Factor I)* ; ses teneurs dans le lait restent dans les limites physiologiques de variation. Il a en plus été vérifié chez le rat que l'administration orale d'IGF-I ne provoquait pas d'accroissement des concentrations sanguines en IGF-I et que celle-ci n'était donc pas résorbée.

Enfin, des données toxicologiques confirment les preuves d'innocuité précédentes. L'administration orale de BST chez le rat pendant 90 jours jusqu'à des doses de 50 000 microgrammes par kilogramme et par jour ne produit aucune réponse de croissance ni aucun effet défavorable. Ceci démontre l'absence quelconque d'effets biologiques ou toxiques par voie orale, aussi bien de la BST que de ses métabolites. En extrapolant à l'homme les résultats obtenus chez l'animal, un enfant de dix kilogrammes pourrait consommer sans danger 50 000 litres de lait par jour contenant dix microgrammes par litre de BST !

L'argument économique semble plus pertinent dans un pays surproducteur de lait, mais, pour qu'une interdiction soit efficace, il faudrait qu'elle soit européenne, voire mondiale. Or la BST est déjà enregistrée dans certains pays ; il semblerait injuste de pénaliser les producteurs de lait européens. On peut espérer que l'utilisation de la BST sera régie par les lois du marché et que, si la molécule n'apporte aucun bénéfice économique, elle sera rejetée.

Il y a beaucoup à faire pour la préservation de l'environnement et de notre santé : ne nous épuisons pas à chercher à éliminer des dangers inexistants !

Jean-Dominique Puyt est professeur de pharmacie-toxicologie à l'École nationale vétérinaire de Nantes.

Lucienne Gouguenheim

Lucienne Gouguenheim est Professeur à l'Université Paris-Sud. Ce texte est retranscrit de l'interview réalisée avec Émile Noël, qui sera diffusée sur France Culture le 14 février à 9 heures.

Je suis astrophysicienne et j'ai surtout travaillé sur les propriétés physiques des galaxies et les caractéristiques de l'expansion de l'Univers. Ces deux sujets, au cœur de l'astronomie, sont d'une certaine importance pour la compréhension de la constitution de l'Univers. J'ai plus spécifiquement étudié la formation des étoiles dans les galaxies, en particulier dans les galaxies elliptiques, ces galaxies prodigues qui épuisent très vite toutes leurs ressources en formant des étoiles, et la mesure de la constante de Hubble, qui détermine le rythme d'expansion de l'Univers.

Évidemment les sujets de recherche sont plus ou moins imposés par la progression des disciplines scientifiques (à l'exception, rare, de scientifiques qui créent la vague au lieu de se laisser porter par elle). Encore faut-il que les futurs chercheurs sachent ce que l'on ne sait pas, que les scientifiques prennent la peine d'exposer les limites des connaissances scientifiques et les interrogations prometteuses. Si je n'avais pas suivi un cours d'Every Schatzman, je n'aurais probablement pas choisi ce domaine de recherche : il fut l'un des rares professeurs à décrire, lors de son enseignement, les frontières des connaissances en astronomie.

À mes débuts le champ de recherches était très ouvert : la France avait une bonne position en astronomie, mais l'astrophysique était le domaine en expansion, où les progrès semblaient à la fois marquants et porteurs d'espoirs. J'abandonnai mon projet initial d'être professeur de mathématiques et décidai de devenir chercheur en astronomie ; à l'époque les postes de recherche étaient relativement plus faciles à obtenir.

On peut toujours retrouver, *a posteriori*, dans sa jeunesse, des indices qui semblent vous prédestiner à la carrière que vous avez choisie. J'avais ainsi été très intéressée par les livres de G. Gamov : j'avais découvert une vision qualitative et originale de la physique moderne, et j'avais construit un télescope d'amateur avec mon frère. Mais j'ai étudié aussi le grec et le latin, que l'on n'aurait pas manqué de considérer comme un intérêt pour les lettres si j'avais poursuivi dans cette voie. Les mathématiques que je connaissais me préparaient bien à l'astronomie. J'ai assez bien vécu l'introduction de la théorie des ensembles dans l'enseignement mathématique car j'avais en tête des exemples pour illustrer une théorie désincarnée. La génération d'étudiants qui a suivi n'a pas eu la chance d'avoir fait l'analyse avant d'être exposée à la synthèse et ces étudiants ont souffert d'une abstraction bien mal adaptée à la compréhension des phénomènes naturels. Je suis démunie devant les étudiants qui n'ont pas de schémas géométriques en tête, je ne sais comment leur transmettre la connaissance.

L'enseignement français est d'ailleurs trop mathématisé, on y enseigne mal les sciences expérimentales, on veut aller trop loin, trop vite ; le crible de la sélection laisse passer des étudiants qui sont trop uniformes dans leurs talents et leurs visions scientifiques. La sélection se fait de façon équitable, mais elle n'est pas aussi ouverte vers l'originalité qu'on pourrait le souhaiter. On recrute, avec le système français, de bons matheux, de bons physiciens, mais rarement les esprits originaux qui refusent le moule classique et qui ont parfois la « petite étincelle ». C'est cette petite étincelle qui allume le feu des découvertes (quand la récolte préalable d'informations a été bonne).

L'astronomie fascine, mais l'image de la recherche en astronomie est encore trop floue : les élèves des lycées, les professeurs et les jeunes étudiants n'ont pas une bonne compréhension du fonctionnement de la science. D'une part les médias ont trop tendance à suggérer, par l'emphase qu'ils accordent à la technologie, que la performance technologique est la finalité de la recherche spatiale, et d'autre part, on voudrait, semble-t-il, faire croire que la science progresse par bonds ex nihilo, seuls matière à « scoops ».

Or un nombre important de découvertes tombent comme le fruit mûr de recherches systématiques bien

conduites. Ainsi, après que le satellite IRAS a observé le rayonnement dans l'infrarouge lointain de l'intégralité du ciel, on a découvert d'extraordinaires galaxies, sièges d'une flambée de formation d'étoiles liés à des processus physiques spectaculaires ; ces jeunes étoiles bleues rayonnent fortement dans l'ultraviolet.

Un autre exemple porte sur les mesures systématiques des vitesses radiales des galaxies, qui ont permis de les associer, à certaines échelles, en filaments et en bulles. Cette découverte n'est pas le fruit du hasard, car elle résulte d'observations systématiques, mais elle fut inattendue.

Les grandes satisfactions d'une carrière de scientifique s'appuient souvent sur un certain nombre d'années de travail préparatoire. Le miroir déformant des médias tend à oblitérer tout ce qui pourrait faire apparaître le chercheur comme une petite fourmi pugnace : or des expériences comme *Hipparcos* ont demandé des dizaines de milliers d'heures de préparation.

J'ai eu à quelques reprises la satisfaction d'avoir mis le doigt sur une interprétation solide d'un phénomène permettant des prédictions qui se sont réalisées. Une grande partie de mon travail a consisté à débarbouiller les observations astronomiques d'un biais qui modifie les résultats de mesure de façon assez pernicieuse. On appelle cette erreur statistique le biais de Malmquist. Cette erreur est perverse, car on croit que l'effet est petit – essentiellement il consiste à attacher un poids plus important aux astres les plus lumineux et les plus visibles – alors qu'il modifie de 50 pour cent la « constante » de Hubble. J'ai pu ainsi réinterpréter certains résidus de vitesse trop importants dus à une telle erreur systématique.

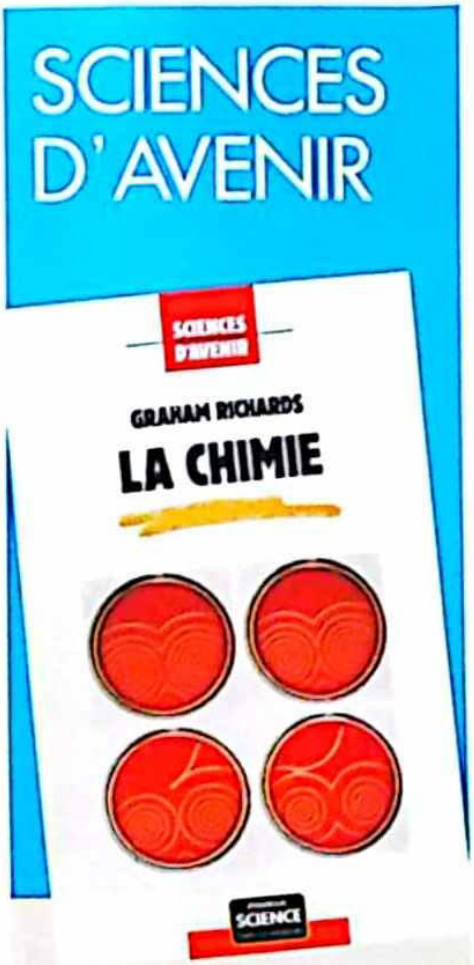
Je n'ai pas été crue tout de suite, et les groupes de recherche dominants n'ont pas tendance à reconnaître promptement leurs erreurs. Le trop grand poids de certains groupes appartenant à des écoles prestigieuses a d'autres inconvénients. Ainsi les équipes monopolisent les temps d'observation sur les télescopes ou, pour atténuer mon propos, s'en attribuent des portions trop importantes, au détriment de mesures peut-être plus originales, plus loin des sentiers battus et qui déboucheraient moins certainement sur des résultats publiables. L'astronomie est une science qui est devenue plus lourde et dont les moyens sont industriels, mais l'essence de la découverte n'est pas programmable comme un processus industriel.

Ce qui est peut-être dommage c'est qu'une spécialisation plus étroite vous oblige à vous perfectionner dans un domaine limité soit une partie du spectre électromagnétique, soit un mécanisme, soit un objet particulier. Si le travail est plus divisé, si le scientifique qui connaît bien toute sa discipline est rare, la diversification a, en contrepartie quelques bienfaits : elle vous oblige à travailler en équipe.

Ce qui chagrine le chercheur, ce sont les occasions manquées : j'ai travaillé sur ce que l'on appelait à l'époque les radio-étoiles, et dont les fascinantes propriétés allaient défrayer la chronique ; c'étaient les quasars. J'avais entre les mains une pépite, mais j'ai laissé à d'autres l'occasion de montrer que c'était de l'or. Un quasar est un noyau de galaxie qui émet une énergie considérable. On a d'abord découvert leurs spectres continus radio ; je les avais à ma disposition, mais la faible dimension de la source faisait croire qu'il s'agissait d'une étoile. La chance de Martin Schmidt a été d'être américain et de disposer du télescope de cinq mètres du Mont Palomar ; son génie a été d'identifier la source d'émission du spectre de raie mesuré par ce télescope avec un objet visible qui n'était pas une étoile, et d'interpréter ce spectre comme un spectre, fortement décalé dans le rouge, émis par un objet extra-galactique très lointain, et donc s'éloignant très vite de nous...

Si c'était à refaire, je recommencerai, mais mon attirance serait peut-être moins forte ; je trouve la recherche trop organisée et l'administration de la recherche trop lourde. Et les décisions prises ne vont pas dans le bon sens : parmi les primes de revalorisation décidées par le ministre de l'Éducation nationale, on distingue les contrats d'enseignement, de recherche et d'administration ; or ce sont les contrats d'administration qui sont les plus rémunérateurs.

L'évolution des structures de recherche a été considérable. Au XVII^e^ et au XVIII^e^ siècle, un chercheur curieux travaillait détaché des soucis matériels dans le cadre d'une société savante, c'était un gentleman chercheur. À l'inverse les organisations de la recherche moderne ne laissent que peu d'autonomie aux chercheurs et à l'originalité de pensée. La créativité individuelle et l'efficacité de l'organisation semblent être des variables canoniques qui ne peuvent être simultanément optimisées. ■



LA CHIMIE

La chimie a bouleversé notre santé, notre alimentation, notre vie quotidienne, nos loisirs : la découverte des nouveaux médicaments, la maîtrise des transformations chimiques élémentaires, l'élaboration des arômes, des engrais et des pesticides, des polymères synthétiques et des fibres artificielles, des colorants et des détergents sont issues de la chimie.

Ce livre décrit la nature des éléments de base de la chimie, les atomes et les molécules et présente les progrès spectaculaires accomplis depuis la découverte des molécules au XIX^e^ siècle, jusqu'aux techniques actuelles les plus élaborées d'analyse et de synthèse de polymères.

Grâce à ces acquis, le chimiste explique la formation et l'évolution de l'Univers, les propriétés de la matière inerte et des molécules de la vie : il agit et manipule l'évolution.

POUR LA SCIENCE DIFFUSION BELIN

Bon de commande page 98 A

Un canal sans eau ?

Le canal de Panama manque d'eau à cause du déboisement excessif et de l'incurie gouvernementale.

Chaque année, environ 12 000 navires empruntent le canal de Panama, l'une des voies de navigation les plus utilisées du monde ; long de 80 kilomètres, le canal relie la mer des Caraïbes à l'océan Pacifique : il épargne aux navigateurs le détour par le cap Horn, soit environ trois semaines de voyage. C'est la principale ressource du Panama : les droits de passage du canal rapportent 350 millions de dollars et constituent huit pour cent du produit national brut. Cependant l'avenir de ce canal est menacé : durant les saisons sèches, le canal manque d'eau et sa trop faible profondeur y a fait interdire la navigation aux navires de forts tonnages.

Cette pénurie en eau résulte de la déforestation intensive des collines situées autour du canal, lors des 30 dernières années. Bien que le gouvernement du Panama et les associations conservatrices aient pris des mesures pour préserver l'activité du canal, les troubles politiques et la crise économique du pays n'ont pas permis de les mettre en pratique efficacement.

La construction du canal de Panama, achevée en 1914, constitua une prouesse technologique. Vers 1880, le Français Ferdinand de Lesseps, qui avait auparavant creusé avec succès le canal de Suez, tenta de creuser un canal, au niveau de la mer, à travers les collines escarpées du centre de l'isthme de Panama : cette tentative fut un échec retentissant qui coûta la vie à de nombreux ouvriers et constitua le plus important scandale financier de la troisième République. En 1903, un Américain, John Stephens, reprit les travaux mais décida de construire un canal surélevé au niveau des collines, coupé par six écluses : les trois écluses de Gatun près de l'Atlantique, l'écluse de Pedro Miguel et les deux écluses de Miraflores près du Pacifique ; seul un segment de 15 kilomètres dut être creusé entre les collines.

Quand un navire franchit une écluse, environ 200 millions de litres d'eau s'écoulent du canal à la mer. Pour compenser cette perte, on réalimente le canal en eau : pour recueillir les précipitations abondantes dans le climat tropical du pays, Stephens construisit un barrage sur la rivière Chagres et créa le lac de Gatun pour collecter les eaux des fortes pluies qui arrosent les montagnes ; l'eau de ce lac réalimente le canal en s'écoulant par gravité dans les écluses. En 1935, on créa une seconde réserve d'eau : le lac de Madden, situé près du lac de Gatun, qui est muni d'un barrage hydroélectrique. Même durant la saison sèche (entre décembre et avril), la quantité d'eau était suffisante pour réalimenter le canal : les forêts situées à la ligne de partage des eaux absorbaient les eaux de pluies, comme une éponge, et les restituaient lors des périodes sèches.

À la fin des années 1970, pour la première fois, le niveau de l'eau baissa tant que le gouvernement dut fermer le canal aux navires de fort tirant d'eau, pour ne pas être obligé de rationner la population en eau et en électricité ; le même phénomène se reproduisit durant l'hiver 1981-1982. Une étude menée en 1986 par des ingénieurs et des environnementalistes panaméens montra que la déforestation intensive de la zone de partage des eaux était à l'origine de la rupture de l'équilibre hydraulique ; en 30 ans, le Panama a perdu 70 pour cent de ses forêts.

Collines déboisées le long du canal de Panama.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

La forêt tropicale uniformise les flux d'eau : elle retient les pluies, qui ne remplissent pas trop rapidement les lacs pendant la saison humide, et libère l'eau durant la saison sèche. Les arbres protègent également le sol de l'érosion, car leurs racines retiennent le sol friable. Le déboisement provoque à la fois un déficit en eau durant les saisons sèches, et un envasement du canal et des lacs, car les limons lessivés par l'érosion s'accumulent au fond des réservoirs, diminuant leur capacité de stockage de l'eau.

La déforestation est une conséquence d'un déséquilibre social et économique : un petit nombre de gros propriétaires terriens occupent les meilleures basses terres du Panama et les petits paysans sont privés de terres exploitables. Aussi ont-ils dû choisir entre l'exode vers la ville de Panama, dont les taudis concentrent la misère, et l'exploitation des régions forestières des collines centrales, qui nécessite l'abattage et le brûlage des arbres. Beaucoup de paysans ont opté pour cette solution ; cependant les récoltes appauvrissent un sol que les paysans abandonnent pour déboiser d'autres terres : chaque année, entre 3000 et 5000 hectares de forêts sont ainsi abattus dans la zone de partage des eaux. En outre, une décision gouvernementale aggrava le déboisement en favorisant l'augmentation de la population de cette zone : le déficit en terres disponibles était tel, en 1947, que le gouvernement construisit une route le long du canal pour rendre accessible les forêts inhabitées ; la population de la zone de partage des eaux, qui comptait 20 000 hommes en 1950, atteignit 110 000 hommes en 1985.

La crise économique et l'instabilité politique du pays accentuent la menace qui pèse sur le canal de Panama. Le général Manuel Noriega, tyran dont la fortune provient du trafic de la drogue, a été renversé après avoir exercé huit ans de dictature sur le pays. De nombreuses émeutes ont eu lieu au Panama durant ces dernières années : le Panama est devenu un des pays « chauds » du monde ; les banquiers étrangers n'investissent plus et l'économie du Panama s'effondre.

Le gouvernement panaméen a néanmoins tenté de protéger les forêts par une loi, promulguée il y a deux ans, qui interdisait l'abattage des arbres de plus de cinq ans. Cependant l'administration ne peut faire respecter cette loi par manque d'argent ; à la suite des troubles politiques, les États-Unis ont suspendu toute aide humanitaire au Panama, et les Panaméens ont répliqué en chassant du pays l'agence américaine qui finançait l'application de la loi. En fait, l'histoire du Panama est liée aux États-Unis : en 1903, le Panama prend son indépendance vis-à-vis de la Colombie avec l'aide des États-Unis, en échange d'un droit de souveraineté sur le pays et de l'administration du canal de Panama ; en 1977, le traité de Panama établit le contrôle progressif du canal par les Panaméens, de façon à ce qu'en l'an 2000 les États-Unis abandonnent tout rôle au Panama. Actuellement, l'administration du canal est assurée par la Commission du Canal de Panama, dominée par les États-Unis.

Les membres les plus éclairés du gouvernement proposent de protéger les forêts, de reboiser et de reconvertir les petits paysans vers une agriculture qui préserve la forêt ; l'augmentation du droit de passage sur le canal pourrait subventionner les coûts des mesures à prendre. Par ailleurs, il existe d'autres alternatives au canal, qui n'est de toutes façons plus adapté aux supertankers modernes ; la Commission du Canal et le gouvernement panaméen étudient quatre projets : la construction d'un canal au niveau de la mer, tel que l'envisageait Lesseps, ne nécessitant ni écluses ni alimentation extérieure en eau ; l'élargissement et l'approfondissement du canal existant, solution moins coûteuse mais n'affranchissant pas le canal d'une alimentation en eau ; la construction d'un chemin de fer parallèle au canal, permettant le transfert des marchandises entre les bateaux des deux côtes ; un compromis entre l'élargissement du canal et les transports ferroviaires ou routiers parallèles. Devant le coût de ces opérations, Panama est tenté de céder le contrôle du canal aux deux principaux utilisateurs, les États-Unis et le Japon, mais cette décision s'opposerait au désir d'autonomie du pays.

Pratiquement l'avenir du canal est aujourd'hui assuré par une association non gouvernementale d'environnementalistes et un Institut de recherche tropicale : la première protège, par des clôtures que les agriculteurs respectent, le Parc national de Chagres qui couvre 120 000 hectares de collines boisées dans la zone de partage des eaux ; le second participe à l'éducation de la population pour le respect de la forêt. Parallèlement les biologistes étudient des projets d'exploitation de la forêt sans déboisement ou sans dommages pour le sol.

Un nouveau récepteur de l'adrénaline

Sans doute impliqué dans l'obésité.

La noradrénaline et l'adrénaline sont deux hormones qui augmentent le nombre et la force des contractions du cœur ; mise en jeu soudainement au cours des divers types d'agression, l'adrénaline est « l'hormone d'urgence ». Ces hormones, des catécholamines, agissent par l'intermédiaire de deux types de récepteurs membranaires appelés β1-et β2-adrénergiques ; elles agissent aussi sur la relaxation de la trachée et de la paroi pulmonaire en se liant aux récepteurs β2-adrénergiques. On simplifie souvent ces différentes interactions en localisant les récepteurs β1-adrénergiques essentiellement sur la paroi du cœur et les récepteurs β2-, sur les parois des poumons : on parle généralement des récepteurs β1 cardiaques et des récepteurs β2 pulmonaires (bien que les deux types de récepteurs existent, en proportions très différentes, dans ces deux organes).

On connaît des molécules qui se fixent sur ces récepteurs et empêchent les deux hormones d'agir : ce sont des antagonistes des récepteurs β-adrénergiques, appelés des β bloquants, médicaments utilisés contre certaines affections cardiaques et pour la découverte desquels James Black a reçu le prix Nobel en 1988.

Cependant les antagonistes les plus puissants, le propranolol et l'alprénolol, ne bloquent pas toujours les réactions biochimiques apparemment régulées par les récepteurs β-adrénergiques : on sait que les catécholamines agissent sur le métabolisme des graisses en contrôlant la libération de glucose et la mobilisation des graisses hors du tissu adipeux. Or ces réactions de lipolyse ne sont pas inhibées par les antagonistes des récepteurs β1-et β2-adrénergiques. Pour expliquer ces réactions inattendues, on a longtemps évoqué l'existence de récepteurs β-adrénergiques « atypiques », ni β1 ni β2. Mettant un point final à de longues et vives controverses concernant l'existence de ce troisième type de récepteur, Laurent Emorine et ses

collègues de l'unité CNRS dirigée par Donny Strosberg, dans le Département des biotechnologies de l'Institut Pasteur, ont découvert un nouveau récepteur des catécholamines, le récepteur β3-adrénergique, responsables des réactions « parasites ».

Les récepteurs β1- et β2- présentent de nombreuses séquences homologues (70 pour cent environ de l'ensemble de la molécule) ; espérant que l'hypothétique troisième récepteur aurait une structure proche de celle des deux autres, ces chercheurs ont séparé les deux brins de l'ADN du gène codant le récepteur β1, et en ont utilisé un pour sonder le génome ; un gène qui n'était ni celui codant le récepteur β1-, ni celui codant le récepteur β2- a ainsi été identifié par la sonde. Ce gène a été introduit dans le génome de cellules d'ovaires de hamster chinois, lesquelles ont synthétisé la molécule que code ce gène.

De plus, après avoir incorporé le gène, ces cellules, normalement dépourvues de récepteurs β-adrénergiques, fixent l'adrénaline et la noradrénaline, et l'activité de l'enzyme adénylate cyclase augmente : lorsque l'adrénaline se fixe sur un récepteur membranaire β-adrénergique, elle active une protéine localisée dans la membrane, la protéine *Gs*, qui elle-même stimule la production d'adénylate cyclase, une enzyme qui favorise la production d'AMP cyclique, « l'énergie » de la cellule. On suit cette cascade d'activations en mesurant la concentration intracellulaire en AMP cyclique.

L. Emorine et ses collègues ont comparé ces cellules transfectées par le gène récemment découvert et des cellules transfectées par les gènes codant les récepteurs β1- et β2- adrénergiques ; il existe d'importantes différences entre les activités pharmacologiques des trois types de récepteurs : le propranolol qui bloque l'activité des récepteurs β1 et β2 est totalement inefficace sur les récepteurs β3. Qui plus est, le pindolol et l'oxprénolol, qui sont des antagonistes des récepteurs β1 et β2 non seulement n'inhibent pas les récepteurs β3, mais ils en renforcent l'action : ils jouent le rôle d'agonistes.

Ces ligands agonistes potentialisant l'action des substances qui se lient aux récepteurs β3-adrénergiques pourraient être utilisés dans certaines affections pour lesquelles on ne possède pas de traitement efficace, comme l'obésité et le diabète gras : l'adrénaline et la noradrénaline auraient une action lipolytique lorsqu'elles se fixent sur les récepteurs β3, présents à la surface des adipocytes (les cellules graisseuses) ; on a découvert que l'adénylate cyclase activée par la fixation de la noradrénaline sur les récepteurs β3 déclenche la dégradation des graisses, tandis que lorsque la noradrénaline se lie aux récepteurs β1, elle active bien l'adénylate cyclase, mais cette dernière n'a alors aucune activité lipolytique. Les substances synthétiques qui potentialisent l'action lipolytique des catécholamines et qui sont de puissants agents anti-obésité chez les animaux, se fixent sélectivement sur les récepteurs β3-adrénergiques. Il reste à comprendre pourquoi seuls les récepteurs β3-adrénergiques semblent impliqués dans l'obésité, et pourquoi l'adénylate cyclase n'a pas toujours la même efficacité.

Il est intéressant de noter que pour confirmer l'existence d'un récepteur proposé par les pharmacologistes et les cliniciens, les pastoriens ont utilisé les outils de la biologie moléculaire pour cloner et séquencer le gène, ceux de la biologie cellulaire pour faire exprimer le gène par des cellules eucaryotes, ceux de la pharmacologie pour favoriser ou inhiber les liaisons entre récepteurs, agonistes et antagonistes, et enfin ceux de l'enzymologie pour suivre l'activation de l'adénylate cyclase.

Récifs et glace

Les coraux enregistrent fidèlement les variations du niveau marin.

Si le réchauffement actuel de la Terre menace d'élever le niveau des mers, les estimations de cette élévation sont très incertaines : les prévisions varient, pour le milieu du XXI[e] siècle, entre quelques centimètres et un ou deux mètres. L'étude des variations climatiques passées nous renseigne sur l'importance relative des facteurs agissants aujourd'hui et donc sur la fiabilité des estimations actuelles. En étudiant des coraux, Richard Fairbanks, de l'Observatoire de géologie Lamont-Doherty à l'Université de Columbia, a reconstitué avec précision l'élévation du niveau des océans lors des 17 derniers millénaires : cette période a été marquée par deux épisodes de montée des eaux, brusques et très rapides.

Il y a seulement 17 000 ans, pendant la dernière glaciation, les paysages étaient très différents d'aujourd'hui : on pouvait aller en Angleterre à pied, la Manche était complètement à sec. Le niveau des océans était environ 120 mètres (à cinq mètres près) plus bas, car une quantité considérable de l'eau de notre planète était prise en glace : la Scandinavie était recouverte par trois kilomètres de glace et le Canada, par quatre kilomètres.

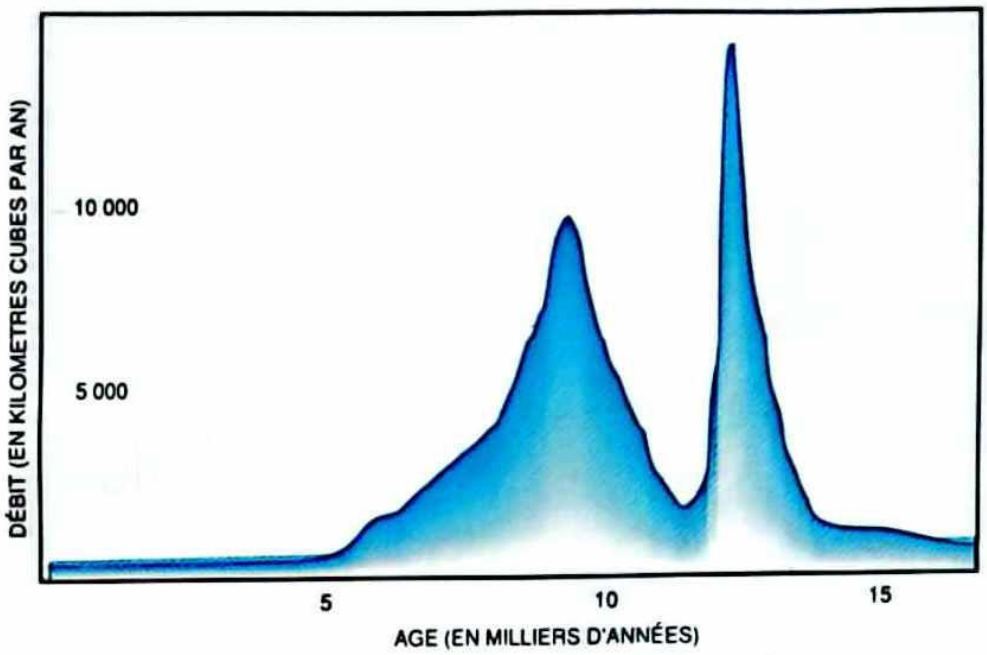
Lorsque la température du Globe augmente, le niveau des océans s'élève : les glaces polaires et continentales fondent. L'eau des océans se dilate aussi, mais l'effet est moins important. R. Fairbanks a prélevé des carottes dans des récifs submergés, constitués d'*Acropora palmata*, au large de La Barbade, dans les îles Caraïbes. *Acropora palmata* est une espèce de corail à croissance très rapide, qui vit juste sous la surface de l'eau et dont la position suit le niveau de l'eau. Les colonies de corail vivent à la surface du récif, sur un substratum de coraux morts, fossiles, dont chaque « couche » correspond à un niveau d'élévation de la mer. Les chercheurs ont daté, avec la méthode au carbone 14, les différents niveaux de coraux morts. Ils mettent en évidence, au sein de la montée générale des eaux, deux épisodes de montée très rapides : une élévation de 24 mètres, il y a 12 500 ans, et une autre de 28 mètres, il y a 10 500 ans, les deux s'effectuant en moins de 1000 ans.

Il existait deux hypothèses concernant la dynamique de la fonte des glaces polaires, après la dernière glaciation : une fonte régulière qui s'est accélérée il y a 11 000 ans ; une fonte irrégulière, qui s'est accélérée entre 14 000 et 12 000 ans, a stagné, puis a réaccéléré entre 10 000 et 7000 ans.

Les travaux de R. Fairbanks confirment et précisent la seconde hypothèse, « l'hypothèse française », ainsi dénommée car elle émane de Jean-Claude Duplessy, du Centre des faibles radioactivités de Gif-sur-Yvette, et de Jean Moyes et ses collègues de l'Université de Bordeaux. Ces chercheurs avaient analysé les compositions isotopiques en oxygène 16 et 18 de sédiments marins très épais, au large de l'Irlande, et avaient retrouvé la trace des deux épisodes brefs.

Pour reconstituer les variations de volume des glaces polaires, on mesure les concentrations en oxygène 16 et en oxygène 18 de certains foraminifères. La proportion entre les deux isotopes n'est pas constante : les variations résultent d'une ségrégation

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990



Débit des eaux de fonte glaciaire, calculé d'après les variations des niveaux de coraux.

isotopique, c'est-à-dire une modification de la proportion naturelle entre les deux isotopes par un phénomène physique ou chimique. Sous les tropiques, les molécules d'eau constituées d'oxygène 16, plus léger, s'évaporent plus rapidement que les molécules d'oxygène 18. En précipitant sur les pôles, les eaux forment une glace qui contient une forte proportion d'oxygène 16. Lorsque la température du Globe s'élève et que cette glace fond, les océans polaires reçoivent une eau dont la quantité d'oxygène 16 est surabondante. Les carbonates qui constituent la coquille des foraminifères marins, présentent les mêmes proportions isotopiques en oxygène 16 et en oxygène 18 que celles de l'eau où ils se forment ; ces proportions dépendent directement de l'intensité de la fonte des glaces polaires.

On pensait que le Dryas récent, un épisode froid entre 10 700 et 10 000 ans, correspondait à un accroissement du volume des glaces. Grâce à ces travaux, on sait que ce volume n'a pas changé pendant cette période : le refroidissement est plutôt dû à une modification de la circulation profonde océanique. Les eaux de fonte de la calotte glaciaire canadienne se déversaient vers le Sud par la vallée du Mississipi jusqu'en 11 000 avant notre ère, puis cette fonte s'est opérée par le bassin du Saint Laurent ; cette brusque arrivée d'eau douce aurait donc modifié les climats de l'Atlantique Nord. Avec cette courbe très précise, R. Fairbanks montre qu'une modification de la circulation des eaux à la surface de la Terre peut entraîner des effets désastreux pour l'homme.

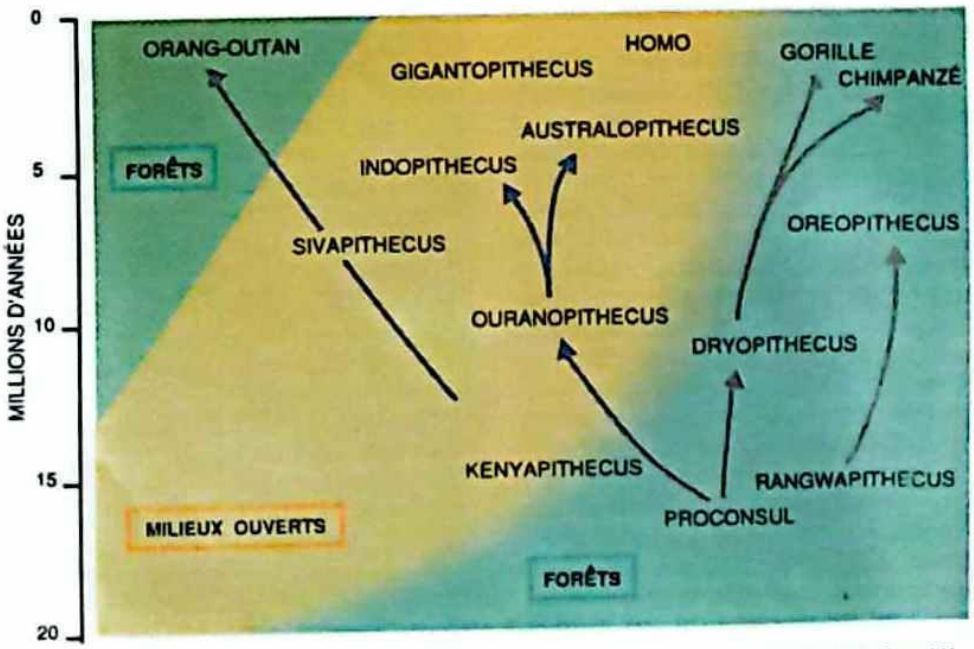
La Grèce, terre de nos ancêtres ?

Le nouveau crâne d'*Ouranopithecus*.

Les Australopithèques de l'Afar, popularisés par le célèbre squelette de « Lucy », étaient considérés comme le maillon le plus ancien de la chaîne évolutive qui, après de nombreux avatars, devait conduire jusqu'à l'Homme moderne. Dans les années 1970, on a pensé que *Ramapithecus*, représenté par un fossile provenant du Miocène supérieur des collines de Siwalik, au Sud de l'Himalaya, était l'ancêtre probable des Hominiens du Plio-pléistocène ; cette hypothèse allait s'effondrer lorsque l'on montra que ce Ramapithèque n'était que la femelle d'un autre grand primate : le Sivapithèque, dont la face, découverte sur ces entrefaites, montrait une parenté étroite avec l'orang-outan. *Ramapithecus* n'était pas plus proche de nous que les orangs-outans.

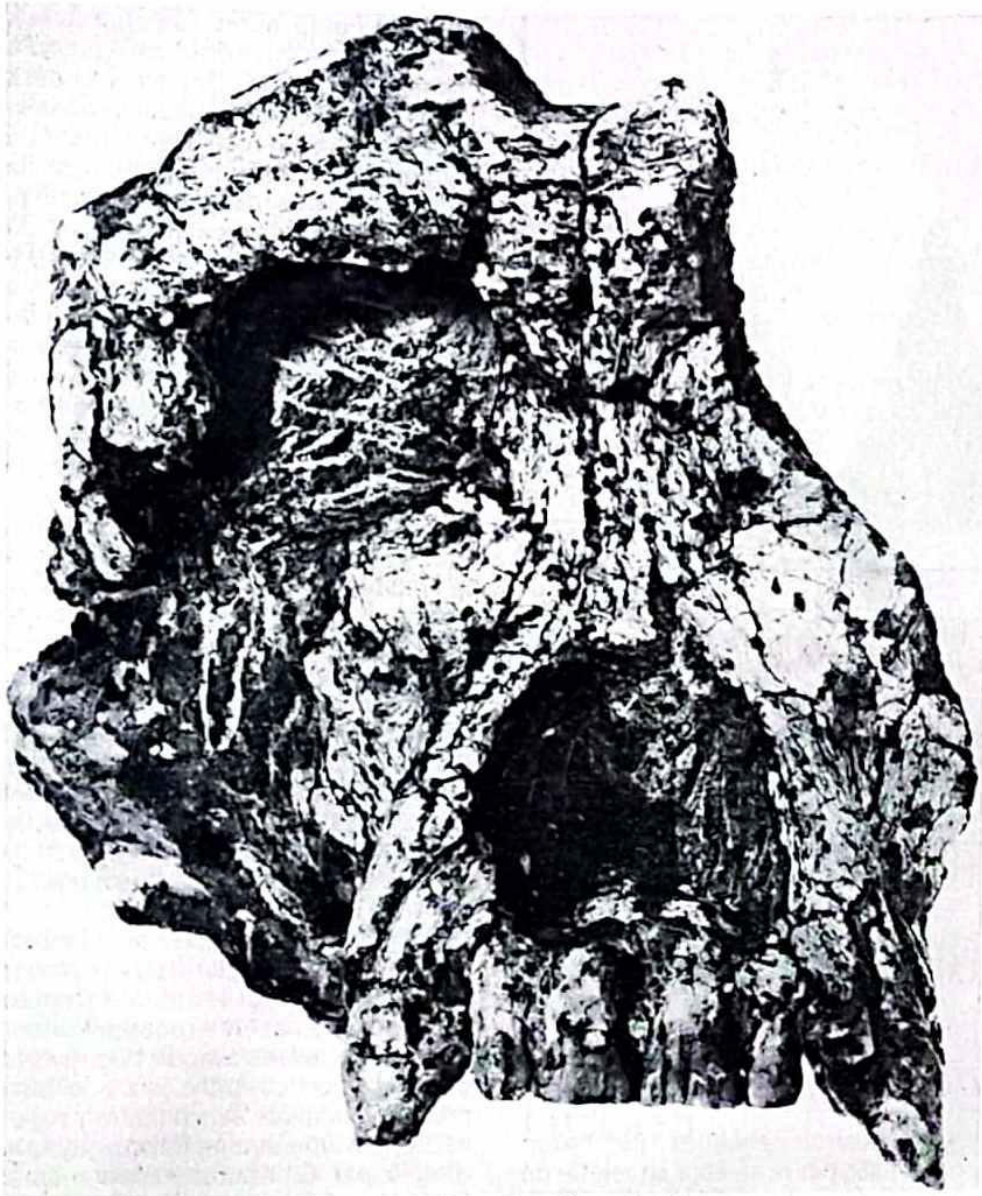
Les conclusions relatives au Ramapithèque avaient été en partie le fruit de l'étude du dimorphisme sexuel d'un autre primate exhumé en Macédoine, dans le gisement du ravin de la pluie, et appelé *Ouranopithecus*. Ce fossile, daté de neuf à dix millions d'années, présentait également des caractéristiques dentaires le rapprochant des Australopithèques primitifs et il était dépourvu des spécialisations de la région naso-maxillaire qui caractérisent l'orang-outan et ses ascendants directs.

Cependant l'absence de matériel crânien plus complet faisait planer certains doutes sur les affinités de ce fossile. Certaines interrogations viennent d'être levées avec la découverte d'une portion de crâne, avec la face presque complète et la dentition supérieure, par une équipe franco-grecque dirigée par G. Koufos et moi-même. Le nouveau fossile provient du site de Xirochori, proche du ravin de la pluie



1. Scénario évolutif proposé entre certains Primates hominoïdes miocènes et les familles des Pongidés et des Hominidés.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990



2. *Ouranopithecus*, un ancêtre de l'Homme, il y a dix millions d'années.

et situé dans le même niveau géologique.

La morphologie de la face renforce l'hypothèse qui établit qu'*Ouranopithecus* est un jalon lointain de la lignée humaine. Sa denture robuste, où prémolaires et molaires sont revêtues d'une épaisse couche d'émail, lui permettait de se nourrir dans une savane d'aliments coriaces, racines et tubercules, alimentation de fortune qui suppléait à l'absence saisonnière de fruits ou autres nourritures plus tendres. La faune qui accompagne le primate est composée surtout de mastodontes, cousins de nos éléphants, de girafes et d'antilopes, ainsi que d'un Équidé tridactyle, le genre Hipparion, qui jouait le rôle dévolu actuellement aux zèbres. Des carnivores complétaient ce contexte faunique, dont le cachet rappelle celui de la savane africaine. *Ouranopithecus* vivait certainement en troupe, mais son mode de déplacement reste conjectural. Probablement quadrupède, on ne peut savoir si son squelette présentait déjà les prémisses de caractères montrant une tendance vers la bipédie. Sa présence, hors d'Afrique, berceau originel des primates, n'est pas surprenante, dans la mesure où, par le jeu de la tectonique des plaques, l'Afrique et la plaque arabique entraient en contact avec l'Eurasie il y a entre 16 et 17 millions d'années, permettant de nombreux échanges fauniques entre les deux continents.

Ce fossile remet en question certaines datations proposées par la biologie moléculaire pour la séparation entre la lignée humaine et celle des grands singes africains, chimpanzés et gorilles. Cette séparation serait beaucoup plus ancienne que les cinq millions d'années avancés. Il ne faut pas oublier que l'horloge moléculaire doit être étalonnée sur des fossiles et que les travaux récents montrent que l'implantation des primates catarhiniens en Afrique est beaucoup plus ancienne qu'on ne le croyait.

Louis de BONIS

Gélatine et percolation

La théorie de la percolation décrit la prise en gel.

Chaque année, 150 000 tonnes de gélatine servent de matière première pour la fabrication du papier, des allumettes, des cigarettes, des cosmétiques, des médicaments, des films photographiques et, surtout, des produits culinaires. Récemment des polymères organiques produits par biosynthèse (xanthanes) ou extraits des algues (carraghénanes, alginates...) ont concurrencé la gélatine, mais cette dernière reste indispensable en raison de ses propriétés exceptionnelles et de son absence de toxicité. Comment s'effectue la gélification de la gélatine ? Quelle est la structure du gel ? L'optimisation des propriétés de la gélatine dépend des réponses à ces questions.

À l'École supérieure de physique et chimie industrielles (ESPCI), Madeleine Djabourov et ses collègues du Laboratoire de physique thermique ont découvert que la théorie de la percolation décrit bien le phénomène de la gélification de la gélatine. Ils ont également découvert que la gélification n'est jamais achevée.

La gélatine est la protéine extraite du collagène, la matière fibreuse présente dans la peau, les os et les tissus conjonctifs. Dans l'organisme, le collagène est constitué de fibres, elles-mêmes formées de fibrilles de tropocollagène, molécules résultant de l'enroulement de trois chaînes d'acides aminés ; ces triples hélices sont stabilisées par des liaisons covalentes et des liaisons hydrogène.

La structure du collagène est détruite par chauffage en présence d'eau, à une température supérieure à 40 °C environ : les liaisons covalentes entre chaînes sont brisées par hydrolyse, et les chaînes d'acides aminés se désenroulent, se séparent

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

et se replient sur elles-mêmes en pelote : quand la solution contient plus d'un pour cent de gélatine, en masse, les pelotes s'enchevêtrent. Puis quand on refroidit la solution, le gel se forme : les chaînes tendent à se réassocier localement par trois pour former des triples hélices, identiques à celles du tropocollagène, mais qui ne sont plus stabilisées que par des liaisons hydrogène.

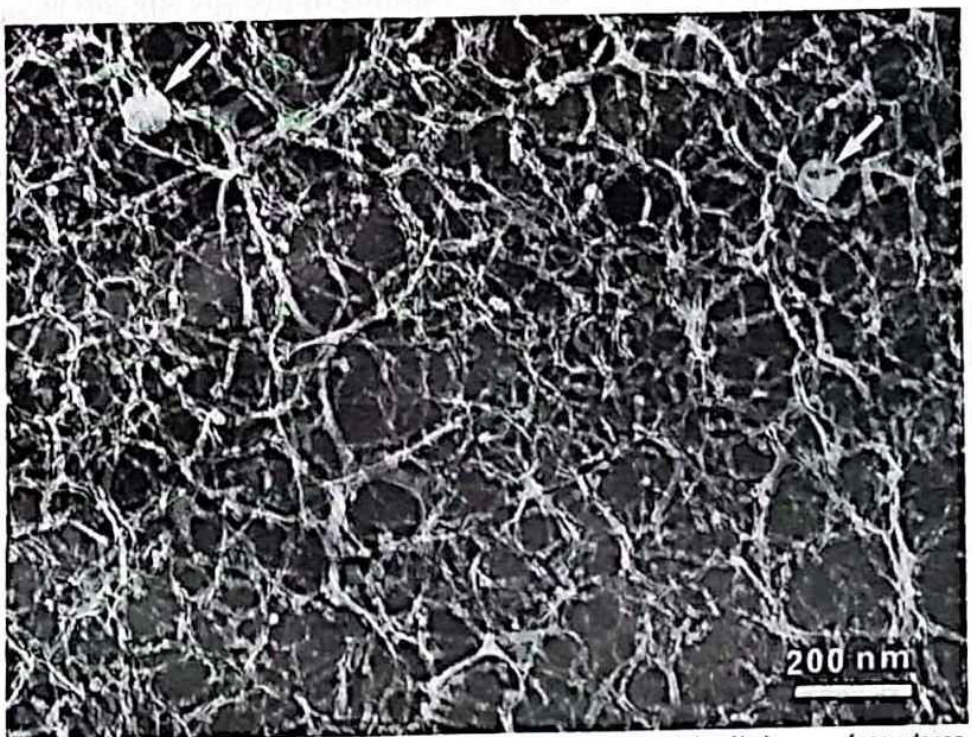
Comme les hélices, dispersées au hasard dans la solution, sont toutes enroulées dans le même sens, elles font tourner le plan de polarisation de la lumière : par polarimétrie optique, on étudie la proportion d'hélices présentes dans une solution. Les physico-chimistes ont ainsi montré que la reformation des hélices n'est jamais achevée et dépend notablement des traitements thermiques que les protéines ont subis. Comme dans le phénomène de transition vitreuse, bien étudié en physique des polymères ou des liquides surfondus, la quantité d'hélices reformées dépend de la vitesse à laquelle on refoidit la solution. La limite de la proportion d'hélices reformées est égale à 60 pour cent, mais cette limite est atteinte lentement. Quand on « trempe » une solution de gélatine à une température assez basse, la formation des hélices est d'abord rapide, puis elle ralentit ; la reformation des hélices se poursuit indéfiniment. Comme la reformation des triples hélices commence simultanément en de multiples points des chaînes, des triples hélices régulières ne se reforment que si les boucles et autres défauts sont éliminés. C'est ce long processus de croissance de triples hélices par élimination des défauts qui ralentit considérablement la gélification et, en pratique, maintient les gels dans un état de déséquilibre thermodynamique.

Les gels apparaissent comme des milieux désordonnés, où des liaisons établies au hasard entre les chaînes créent un réseau tridimensionnel, et des physiciens, notamment Pierre-Gilles de Gennes, ont supposé que le phénomène de gélification serait analogue à un phénomène de percolation ; on a pensé décrire la gélification comme une transition de phase critique, où, au voisinage d'une température critique, les propriétés varient considérablement en fonction de la température.

Dans une solution qui gélifie, le nombre de jonctions établies entre les chaînes d'acides aminés joue un rôle équivalent à la température. Dans les gélifications chimiques qu'étudient généralement les physico-chimistes, les chaînes sont liées entre elles par des liaisons covalentes, permanentes, qui résultent d'une réaction chimique. Lorsque la réaction dépasse un certain « seuil de percolation », ou point de gel (c'est-à-dire pour une proportion donnée de liaisons formées), un réseau tridimensionnel se forme dans toute la solution. Les théories de percolation décrivent les effets liés à l'augmentation des interconnexions dans les milieux désordonnés. Elles prévoient notamment qu'au-dessus du point de gel, le module élastique augmente très rapidement, proportionnellement au nombre d'interconnexions élevé à un exposant « critique ».

M. Djabourov a montré que dans les gels de gélatine – qui sont des gels physiques, où les liaisons sont des liaisons hydrogène, de nature physique et non chimique –, la transition sol-gel est analogue à une transition de phase décrite par une théorie de percolation si l'on suppose que la proportion de liaisons formées est proportionnelle à la proportion de triples hélices. Elle a notamment mesuré le module élastique de cisaillement à l'aide d'un rhéogoniomètre de Weissenberg : dans ce type d'appareil, on fait subir à la solution en cours de gélification un cisaillement d'amplitude très faible ; la solution est confinée entre deux plateaux parallèles, dont l'un oscille et l'autre est maintenu fixe ; on voit alors que le module d'élasticité augmente brusquement quand le réseau de chaînes interconnectées se forme, au point de percolation.

Les sociétés comme *Sanofi-Bio-Industries*, le premier fabricant mondial de gélatine, s'intéressent naturellement à ces études qui précisent la structure des gels et amélioreront l'utilisation de la gélatine. Grâce aux découvertes récentes, on sait notamment pourquoi la structure des gels est plus résistante quand ils sont formés à haute température et pourquoi les solutions gélifient plus vite quand on évite de les déformer, à certaines étapes du processus.



Micrographie électronique obtenue par congélation ultrarapide d'un gel de gélatine : un réseau dense, fibreux, très désordonné apparaît en clair sur le fond noir de cette image réalisée par P. Favard et ses collègues du Centre de biologie cellulaire du CNRS, à Ivry-sur-Seine. Les deux sphères marquées par des flèches sont des billes de latex servant à marquer le gel.

Bactéries résistantes

Résistance acquise par pression de sélection.

Pourquoi certaines bactéries sensibles aux antibiotiques deviennent-elles résistantes ? Parce qu'elles acquièrent des gènes de résistance, c'est-à-dire des gènes codant des enzymes susceptibles de dégrader les antibiotiques, dès lors inefficaces. Les

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

chercheurs de l'Unité des agents antibactériens de l'Institut Pasteur étudient les gènes de résistance qui apparaissent, ou plutôt qui se révèlent, lors d'une épidémie. Par exemple, ils ont récemment caractérisé une nouvelle famille de gènes responsables de la résistance aux céphalosporines de troisième génération. Les gènes de résistance préexistent, les antibiotiques ne les créent pas, mais permettent seulement leur sélection.

Ce ne sont pas les individus qui deviennent résistant à tel ou tel traitement, mais ce sont les bactéries infectieuses qui deviennent insensibles à l'antibiothérapie parce qu'elles acquièrent des gènes de résistance. Une population bactérienne possède un matériel génétique qui subit naturellement des modifications qualitatives (les mutations, par exemple) et quantitatives (comme la perte ou l'acquisition de gènes). Ainsi on a montré que les gènes de résistance passaient d'une bactérie à une autre au sein d'une même espèce, mais qu'ils se transmettent également entre espèces très éloignées. Les pastoriens ont même démontré que des bactéries à Gram+ (selon la couleur qu'elles acquièrent en présence du colorant de Gram) peuvent transmettre des gènes de résistance à des bactéries à Gram– : on sait que les gènes issus des bactéries à Gram+ s'expriment naturellement chez les bactéries à Gram– (l'inverse n'est pas vrai), et – *a posteriori* – il n'est pas surprenant que ce soit également le cas pour les gènes de résistance aux antibiotiques.

Une même bactérie peut donc être porteuse de nombreux gènes de résistance, et les transférer à des bactéries d'un autre genre par l'intermédiaire de plasmides, des éléments génétiques extra-chromosomiques localisés dans le cytoplasme. Ce transfert plasmidique est aisé : les deux cellules s'accolent et un brin de l'ADN du plasmide de la bactérie donatrice est transféré à la bactérie réceptrice par l'intermédiaire d'un pont cytoplasmique ; il permet la circulation des gènes de résistance.

Une bactérie sensible peut devenir résistante de trois manières différentes : parce qu'un gène de résistance connu lui est transmis par une espèce déjà résistante, parce qu'une nouvelle mutation sur un ancien gène lui confère un nouveau spectre de résistance, ou bien parce qu'elle acquiert un gène de résistance, encore inconnu. Les mutations chromosomiques ne se transmettent pas d'une espèce à l'autre et confèrent généralement la résistance à un seul, ou une seule famille d'antibiotique. Au contraire, les plasmides assurent la transmission de gènes entre des espèces différentes, et un même plasmide peut porter plusieurs gènes de résistance ; un même plasmide peut engendrer une multirésistance (à cinq ou six familles d'antibiotiques) et comme on dispose d'une dizaine de familles d'antibiotiques, ces plasmides à forte potentialité épidémique posent des problèmes thérapeutiques aigus.

Pourquoi ces souches résistantes apparaissent-elles ? Elles sont généralement « sélectionnées » en milieu hospitalier : lors d'une infection traitée à l'hôpital, les malades reçoivent souvent des doses massives d'antibiotiques à large spectre. Les bactéries sensibles sont détruites, les autres, résistantes, qui n'ont plus de compétiteurs, se multiplient. Un des exemples récents est celui de la résistance des streptocoques à la vancomycine : cet antibiotique est largement utilisé en milieu hospitalier pour le traitement des infections à staphylocoque et à streptocoque. Après cinq ans d'utilisation massive de cet antibiotique, on voit apparaître aujourd'hui les premières souches résistantes de staphylocoques et de streptocoques. Il faut environ entre deux et six ans pour que la pression de sélection fasse apparaître une souche résistante.

Quels sont les moyens dont on dispose pour détruire les souches résistantes et en limiter l'apparition ? Prendre des précautions d'hygiène afin d'empêcher la propagation des bactéries résistantes, adapter au mieux l'antibiothérapie au germe responsable de l'infection et envisager de nouvelles stratégies pour découvrir des antibiotiques. Ainsi le personnel soignant en contact avec les malades risque de servir de porteur sain à ces bactéries résistantes, et de les transmettre à d'autres patients. De plus, comme l'on favorise l'apparition de nouvelles souches résistantes en prescrivant des antibiotiques à large spectre, il faut essayer de cibler le plus précisément possible le traitement, et donc de prescrire des antibiotiques spécifiques de la souche isolée. On a ainsi remarqué que la proportion des bactéries résistantes diminuait lorsque la pression de sélection cessait : quand on n'utilise plus l'antibiotique qui sélectionne la souche résistante, de nouvelles souches sensibles réapparaissent, qui entrent en compétition avec les bactéries résistantes dont le nombre diminue progressivement. Si on ne maintient pas la pression de sélection, les plasmides instables disparaissent.

Enfin la troisième façon de lutter contre les nouvelles bactéries résistantes consiste à découvrir de nouveaux antibiotiques ou à ajouter à l'antibiotique l'inhibiteur de l'enzyme que sécrètent les bactéries pour le dégrader ; un antibiotique récent associe la bêta lactamine, le principe antibiotique actif, à un inhibiteur de la bêta lactamase, l'enzyme synthétisée par les bactéries résistantes pour dégrader la bêta lactamine. Les concepteurs de ces nouvelles molécules tentent, connaissant les stratégies des bactéries résistantes, d'adapter les leurs : synthétiser des inhibiteurs des enzymes de dégradation, protéger les molécules actives contre la dégradation en modifiant leur configuration, élaborer des molécules synthétiques de plus en plus spécifiques afin de déjouer le plus rapidement possible les mécanismes de défense des bactéries résistantes.

Entre Ptolémée et Copernic

Les idées de Ptolémée furent contestées six siècles avant Copernic.

Comment Copernic a-t-il imaginé que le Soleil, et non la Terre, occupait le centre du Système solaire ? Les travaux des astronomes islamiques, qui prolongèrent les recherches des Grecs, semblent avoir inspiré l'astronome polonais, père de l'héliocentrisme. Les premières pistes de cette fillation des idées sont apparues au siècle dernier, quand on a reconnu l'intense activité scientifique qui a régné en Islam, de la chute de l'Empire romain à la Renaissance. Otto Neugebauer précisa, en 1957, qu'un groupe d'astronomes avait travaillé à Maragha (aujourd'hui Mararhé, au Nord-Ouest de l'Iran) ; les récents travaux de George Saliba, de l'Université Columbia, à New York, confirment que Copernic n'était pas le premier critique de Ptolémée : dès le IX[e] siècle, les astronomes islamiques ont contesté les théories de Ptolémée et proposé plusieurs théories du mouvement des corps célestes.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

En 1893, P. Tannery publia à Paris ses *Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne* : en appendice, figurait un texte où des astronomes de Maragha critiquaient le système de Ptolémée ; l'idée d'héliocentrisme (les planètes tournant autour du Soleil) ne semblait pas présente dans les travaux arabes, mais les modèles géocentriques (les planètes et le Soleil tournant autour de la Terre) de Copernic ressemblaient de façon étonnante aux systèmes imaginés, après Ptolémée, dans le monde de l'Islam. Copernic avait obtenu son modèle héliocentrique à partir des modèles géocentriques des astronomes islamiques, en inversant les rôles du Soleil et de la Terre, et en conservant tout le reste du modèle. On crut alors que le mérite de Copernic était d'avoir abandonné le modèle compliqué de Ptolémée. Las, pour la gloire de Copernic, O. Neugebauer prouva que cette innovation, due aux astronomes arabes, était une substitution et non un abandon.

Les astronomes qui précédèrent Ptolémée supposèrent que les planètes se déplaçaient sur des cercles centrés sur la Terre ; toutefois ces théories n'expliquaient pas pourquoi certains corps célestes, tels que Mars, rétrogradent parfois dans le ciel (ces inversions du mouvement apparaissent quand la Terre dépasse une planète ou est dépassée elle, au cours de sa rotation autour du Soleil).

Au IIe siècle de notre ère, Ptolémée imagina que les planètes se déplacent sur des cercles (les épicycles) dont le centre se déplaçait lui-même sur un cercle plus grand (le cercle déférent). Le problème de l'inversion du mouvement des corps célestes disparaissait au prix de deux artifices : Ptolémée dut admettre que les cercles déférents étaient décentrés par rapport à la Terre, et que le mouvement circulaire des planètes était uniforme par rapport à l'équant, le point symétrique de la Terre par rapport au centre du cercle déférent.

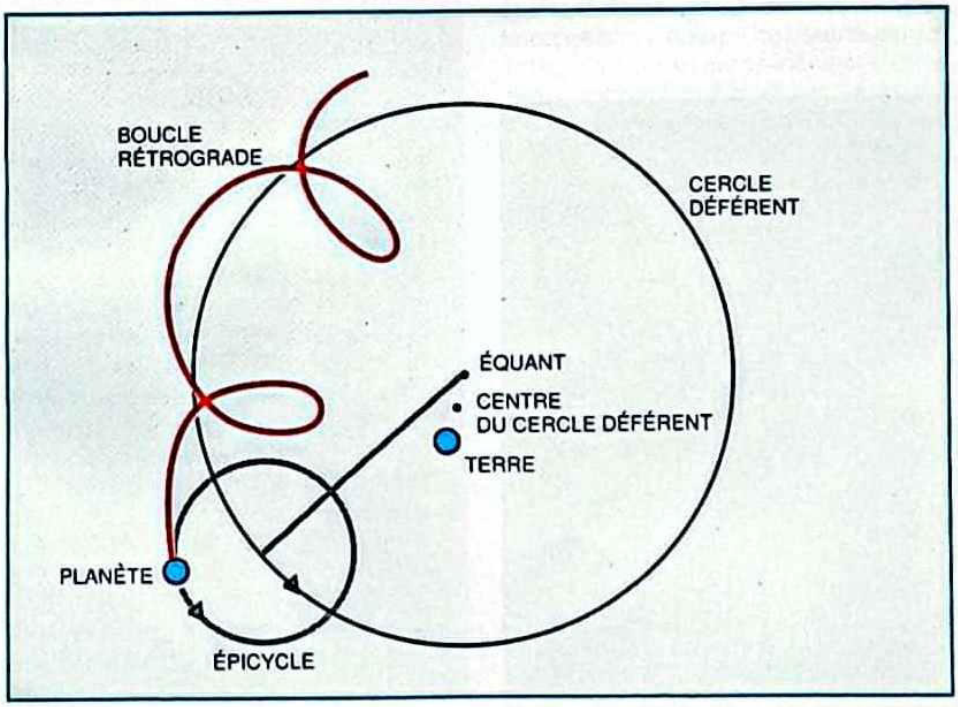
O. Neugebauer découvrit les travaux effectués en Islam et l'existence de l'École de Maragha quand il analysa un traité daté de 1375 et rédigé par l'astronome arabe Al-Shatir : le *Nihayat al-Sul fi tashih al-Usul* (« La quête ultime des vrais principes astronomiques »). En introduction, Al-Shatir mentionne les noms de plusieurs astronomes qui produisirent des systèmes astronomiques différents de ceux de Ptolémée ; dans un autre ouvrage, Al-Shatir mentionne d'autres savants arabes qui critiquèrent les propositions grecques.

Ainsi Copernic n'était que le plus connu des successeurs de l'École de Maragha ; son apport spécifique était l'héliocentrisme. Tout récemment, G. Saliba a découvert des relations importantes entre les travaux de Copernic et ceux des astronomes de Maragha : l'œuvre de Copernic mentionne deux théorèmes respectivement établis par Al-Tusi et par Al-Urdi, également astronomes à Maragha. Le théorème d'Al-Tusi indique qu'une combinaison linéaire de deux mouvements circulaires (sur des épicycles) engendre un mouvement périodique simple ; le théorème d'Al-Urdi stipule que l'on peut remplacer l'excentrage du déférent par un épicycle supplémentaire, dont le centre se déplacerait sur le premier épicycle. Comment Copernic avait-il eu connaissance de ces théorèmes ? Recherchant les vestiges de l'École de Maragha, O. Neugebauer trouva que les découvertes de celle-ci avaient été transmises à l'Occident latin par un manuscrit byzantin. Ce texte contenait une description du modèle lunaire d'Al-Tusi et un diagramme démontrant l'application du théorème d'Al-Tusi à une configuration de corps solides.

Malgré ces travaux, l'influence de l'École de Maragha a été mal perçue : la finalité des Arabes semblait philosophique, alors qu'ils étaient motivés par la nécessité de calculer des calendriers, de prévoir les éclipses, d'orienter les mosquées vers La Mecque et de déterminer l'heure de la prière. G. Saliba a découvert un texte où Al-Shatir a écrit explicitement qu'il n'avait pas d'objection au modèle solaire de Ptolémée, mais qu'il avait proposé un nouveau modèle afin de mieux décrire les observations : les considérations philosophiques n'étaient qu'accessoires.

D'autre part, les astronomes arabes produisaient des tables astronomiques peu différentes de celle de Ptolémée ; aussi pensait-on que la modification des modèles avait eu peu de conséquences pratiques. G. Saliba a découvert que certains astronomes arabes comme Al-Urdi avaient modifié le modèle de Ptolémée surtout parce qu'il était incohérent : dans l'introduction de son *Almageste*, Ptolémée affirmait que le mouvement circulaire uniforme était le seul mouvement que pouvaient suivre les corps célestes, mais son modèle l'obligeait à introduire l'équant, difficile à interpréter physiquement. Pour rendre la théorie cohérente, Al-Tusi présenta un modèle avec deux épicycles pour l'orbite de chaque planète ; un peu plus tard, Al-Shatir reprit le système d'Al-Tusi et il parvint à éliminer le centre de l'équant en introduisant de nouveaux épicycles. Il obtint un système de sphères concentriques autour de la Terre, et expliqua les variations apparentes de la taille du Soleil.

Les études récentes amènent à reconsidérer la description générale de l'hisoire de l'École de Maragha : on croyait qu'après avoir traduit des



Le système de Ptolémée : les planètes décrivent un épicycle dont le centre se déplace sur le cercle déférent à vitesse uniforme par rapport à l'équant (le point symétrique de la Terre par rapport au centre du cercle déférent).

ouvrages grecs, les astronomes les avaient assimilé, puis qu'une courte période de créativité avait été suivie par un déclin, au XIV[e] siècle. Or G. Saliba indique que les résultats très originaux de l'École de Maragha ont été obtenus dans la période de déclin ! En outre, un siècle après cette période de « déclin », vers 1450, un élève d'Ulugh Beg a encore produit un modèle très intéressant du mouvement de Mercure ; or moins de 50 ans séparent ce travail de l'étude de Copernic.

La recherche des sources d'inspiration de Copernic n'est pas terminée : plusieurs traités d'astronomie provenant de l'Islam restent à analyser. L'étude de l'École de Maragha ne fait que commencer.

Un cœlacanthe en aquarium ?

Un projet menace le célèbre fossile vivant.

Selon une équipe d'ichthyologistes, les cœlacanthes risquent de s'éteindre prématurément. Bien que ce poisson ancestral ne soit pas comestible et qu'il vive à plus de 70 mètres de profondeur, les pêcheurs des îles Comores le traquent aujourd'hui avec plus d'acharnement et d'efficacité : le prix d'un spécimen a considérablement augmenté et les techniques de pêche se sont améliorées.

Les spécialistes pensent que les cœlacanthes, qui atteignent 1,5 mètre de long, sont étroitement apparentés aux ancêtres des premiers animaux terrestres. On pensait que ces poissons s'étaient éteints il y a 70 millions d'années, jusqu'à ce qu'un pêcheur en capture un en 1938 ; les autres exemplaires du fossile vivant n'ont depuis été découverts qu'autour des Comores. On ne connaît pas exactement leur nombre, mais Michael Bruton, de l'Institut d'ichthyologie J.L.B. Smith de Grahamstown (Afrique du Sud), pense qu'il n'y en aurait que quelques centaines.

Une population si faible est très vulnérable, aussi les spécialistes, qui se sont réunis en une association pour la protection des cœlacanthes, ont récemment condamné l'ambitieux projet de l'aquarium Toba, au Japon, qui consisterait à capturer deux cœlacanthes vivants, un projet qui risque en outre de déclencher une compétition internationale. Hajime Nakamura, le directeur du projet, espérait capturer et maintenir en vie un couple de cœlacanthes, afin de les transporter au Japon pour étudier la possibilité d'un élevage en captivité. Les membres de l'association contestent la faisabilité du projet, arguant que les cœlacanthes ne peuvent vivre que quelques heures lorsqu'ils sont ramenés à la surface de la mer (probablement à cause des changements de température et de pression). H. Nakamura réplique que son équipe a mis au point un piège qui maintiendra en vie les cœlacanthes, mais il ne révèle pas comment.

L'association doute de l'assurance de H. Nakamura, et pour M. Bruton : « S'ils tentaient vraiment une opération scientifique, ils ne dissimuleraient pas ces informations. » D'autre part, comme le cœlacanthe arrive à maturité en 10 ou 15 ans, M. Bruton et ses collègues pensent que « la capture de spécimens vivants est absurde ; la situation des cœlacanthes est si critique qu'il ne faut pas risquer de les détruire en les transportant autour du monde. » Les ichthyologistes sont plutôt favorables à une étude *in situ* et à la préservation de la population existante.

Le cœlacanthe vient d'être répertorié dans la liste des espèces les plus protégées de la Convention internationale pour les espèces en voie de disparition. H. Nakamura conteste que le cœlacanthe appartienne à cette catégorie des espèces rares : selon lui, la liste ne contrarie pas son projet et la dénonciation des ichthyologistes n'est rien d'autre qu' « une jalousie de spécialiste dont on convoite une partie du territoire ».

Le cœlacanthe dans son milieu naturel.

Hybrides pièges

Des peupliers hybrides, pièges à pucerons ?

Les agronomes protègent les plantes des attaques des ravageurs en utilisant des techniques de lutte chimique, de lutte biologique et de lutte intégrée (association des deux techniques précédentes) : pendant un temps, la lutte chimique est efficace, mais les ennemis des cultures deviennent à la longue résistants aux agents toxiques utilisés ; de plus, ceux-ci présentent des risques pour la santé humaine et pour l'environnement ; quant aux applications de la lutte biologique, elles restent limitées par la difficulté des relations entre hôtes et parasites.

Thomas Whitham, de l'Université de l'Arizona, a publié dans la revue *Science* les détails d'un moyen de lutte original contre des pucerons du peuplier : ses observations portent sur la répartition et la survie de pucerons

responsables de la galle du peuplier, *Pemphigus betae*, chez deux espèces de peupliers de l'Utah et chez l'hybride de ces deux espèces : 85 à 100 pour cent des pucerons attaquent les peupliers hybrides, très sensibles, qui ne représentent pourtant que trois pour cent de la population des peupliers. Selon Th. Whitham, la concentration des pucerons sur la faible proportion de peupliers hybrides protégerait les espèces parentales pures, et les hybrides serviraient ainsi de « pièges écologiques » ; en outre, les peupliers hybrides bloqueraient l'adaptation des pucerons aux espèces parentales et leur évolution, car les quelques pucerons qui se seraient adaptés aux espèces parentales, au cours de l'Évolution, auraient été submergés par la prolifération exceptionnelle des pucerons sur les peupliers hybrides : les hybrides joueraient aussi le rôle de « pièges évolutifs ». On pourrait ainsi contrôler la multiplication rapide des pucerons en utilisant un petit nombre de peupliers hybrides sensibles sur lesquels les pucerons prolifèreraient, préservant les espèces parentales.

Galle du peuplier : l'attaque des pucerons (ici *Pemphigus spirothecae*) sur le pétiole des feuilles produit une excroissance.

Les espèces de peupliers étudiées, qui poussent sur 500 kilomètres le long du lit d'une rivière du Nord de l'Utah, se distinguent par la forme de leurs feuilles : le peuplier de Fremont, qui se développe sur les berges, à basse altitude, possède des feuilles larges et courtes au pétiole allongé ; le peuplier aux feuilles étroites, avec un pétiole court, pousse sur les berges à plus haute altitude. Quand les deux espèces sont géographiquement séparées, on n'observe aucun recouvrement dans la forme des feuilles : les espèces sont pures ; en revanche, dans la zone de 13 kilomètres où les deux espèces se rencontrent, celles-ci se croisent et engendrent une espèce hybride, dont les feuilles présentent une série de formes intermédiaires.

Les pucerons femelles, au début du printemps, attaquent les feuilles de peuplier : quand l'attaque réussit, une excroissance, ou « galle », apparaît, dans laquelle plusieurs centaines d'œufs se développent ; quand l'attaque échoue, une cicatrice demeure, qui permet de mesurer la résistance de l'arbre hôte. La résistance des arbres aux attaques des pucerons varie considérablement d'un arbre à l'autre ; d'une année à l'autre, les pucerons attaquent sélectivement, sur un même site, les arbres génétiquement les plus sensibles.

Th. Whitham a examiné, durant six années consécutives, la répartition des attaques de pucerons dans les différents habitats des diverses espèces : les peupliers de Fremont sont totalement exempts de galles, donc parfaitement résistants ; les peupliers à feuilles étroites sont faiblement atteints et les peupliers hybrides extrêmement sensibles aux attaques des pucerons. La transition de ces attaques est très brutale : sur moins de trois kilomètres, la densité des galles croît de 18 galles pour 10 000 feuilles, chez les peupliers à feuilles étroites, à 457 galles chez les hybrides.

Les pucerons se concentrent sur les peupliers hybrides, car leur taux de survie, mesuré à la fois sur des arbres naturellement et expérimentalement infectés, y est supérieur : environ 60 pour cent de pucerons ont survécu sur les peupliers hybrides, contre 39 pour cent sur les peupliers à feuilles étroites.

Toutefois, si les résultats obtenus par Th. Whitham sont incontestables, ses conclusions ne font pas l'unanimité. André Delplanque, de la Station de zoologie forestière de l'INRA, à Orléans, estime que la présence de peupliers hybrides, sur lesquels les pucerons trouvent les conditions optimales de leur multiplication, favoriserait plutôt la prolifération des pucerons, et même leur adaptation sur les espèces parentales résistantes.

Dans tous les cas, les hybrides très sensibles possèdent sans doute une texture physique ou une composition chimique assez différente de celles des espèces parentales : cette différence pourrait être utilisée dans l'étude des critères intervenant dans la relation hôte-parasite.

Grains de céramiques

Un film de silice intergranulaire renforce la résistance d'une céramique.

Les céramiques sont des solides aux atomes fortement liés, ce qui leur confère une résistance élevée à la chaleur et aux agents chimiques (d'où leurs nombreuses applications), mais aussi une grande fragilité. Pour améliorer les propriétés des céramiques – notamment leur résistance mécanique –, les chercheurs étudient la structure et le comportement microscopiques des céramiques, qui déterminent le comportement macroscopique (conductibilité, résistance mécanique à haute température, fissuration lente...). Un matériau est composé de « grains », ou petits monocristaux (solides formés de la répétition d'un motif de base dans les trois directions de l'espace) ; la façon dont les comportements des grains se transmettent aux interfaces, ou « joints de grains », joue un rôle majeur dans le comportement macroscopique du matériau : on explore la structure et le comportement local des différents types de joints de grains des céramiques, pour optimiser une propriété choisie en favorisant le développement d'un type d'interfaces, lors de l'élaboration.

Alain Thorel, du Centre des matériaux de l'École nationale supérieure des mines de Paris, a montré que certains types d'interfaces étaient moins résistants à la rupture que

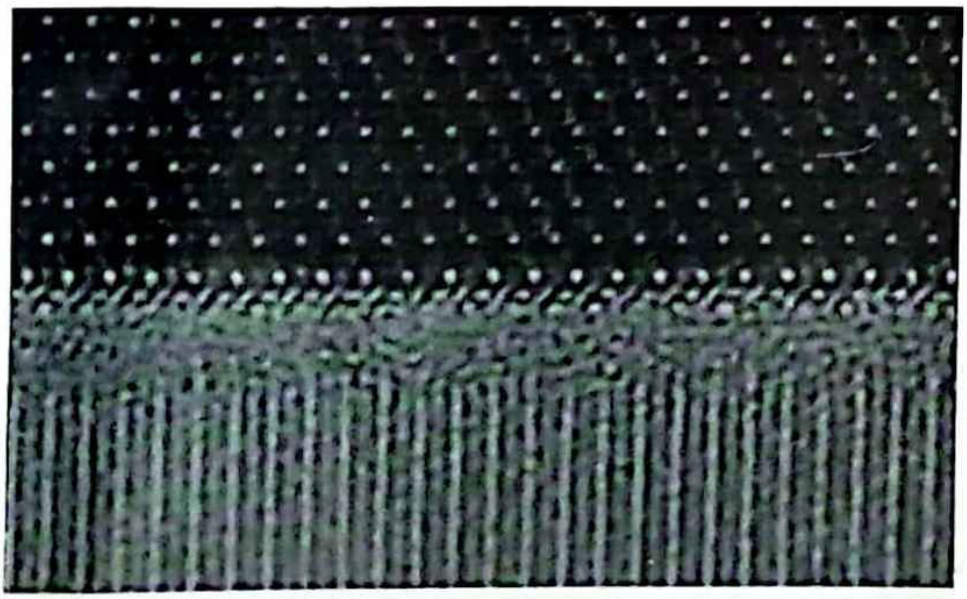
d'autres dans un alliage de nitrure de silicium, le sialon, observé au microscope électronique en transmission ; cependant les « dopants » que l'on ajoute pour faciliter la fabrication des céramiques, forment dans certaines conditions un film interfacial silicaté très organisé, qui renforce la résistance à haute température des interfaces les plus faibles.

La nature de l'interface entre deux grains est déterminée par les orientations des réseaux cristallins de ces grains ; certains grains adjacents sont orientés de sorte que les sites atomiques des deux réseaux coïncident : l'interface, appelée alors « joint spécial », est stable et de basse énergie. Dans la plupart des cas, les réseaux ne coïncident pas : l'interface forme un « joint général », instable et de haute énergie.

La plupart des céramiques sont élaborées par frittage, c'est-à-dire par consolidation et densification d'une poudre, sous l'action de la pression et de la température ; pour accélérer le frittage et pour diminuer la pression et la température requises, on ajoute en faibles quantités des espèces chimiques, comme les oxydes de terres rares, qui forment localement avec la poudre une phase à bas point de fusion. Comme la viscosité de cette phase (qui contient généralement de la silice) est faible aux températures d'élaboration, le frittage est fortement accéléré par un mécanisme de diffusion des atomes en phase liquide. Après refroidissement, cette phase silicatée forme des poches vitreuses de dix nanomètres à un micromètre de diamètre aux points triples (points de jonction entre trois grains), et/ou un film interfacial autour des grains, d'environ un nanomètre d'épaisseur.

Les essais de traction sur lames minces de nitrure de silicium ont permis de suivre en temps réel et à très fort grossissement (supérieur à 100 000) la fissuration du matériau sous l'action d'une contrainte. À température ambiante, sous très faible charge, une fissure intergranulaire progresse préférentiellement (avec de très faibles vitesses, comprises entre un nanomètre et un micromètre par seconde) le long des joints généraux et des interfaces grains-poches vitreuses, car elle y dissipe son énergie plus efficacement ; les joints spéciaux sont dans ces conditions plus résistants à la rupture.

Comment réagissent les poches vitreuses et les films interfaciaux, à haute température ? Les poches vitreuses sont liquides à haute température : lors de l'application d'une charge, elles se comportent comme des défauts à proximité desquels les contraintes sont plus fortes ; quand la charge appliquée est suffisante, ces contraintes locales peuvent produire une rupture brutale. Quand la charge est plus faible, les poches vitreuses se déforment et un flux de verre liquide diffuse le long des interfaces : les joints de grains glissent, et le matériau se déforme macroscopiquement ; en outre, des microcavités apparaissent entre les grains, se rassemblent et forment des défauts étendus, qui pourront ultérieurement provoquer une rupture brutale.



Deux grains de nitrure de silicium *(en haut et en bas)* ont une interface instable et de faible résistance quand les sites atomiques de leurs réseaux ne coïncident pas ; un film interfacial ordonné d'un nanomètre d'épaisseur, à base de silice *(au milieu)*, stabilise cette interface et améliore le comportement thermomécanique du matériau (la largeur de la figure correspond à 17 nanomètres).

Les films interfaciaux, d'environ un nanomètre d'épaisseur, entourent des grains de diamètre compris entre 2 et 20 micromètres. Alors qu'il était admis que la structure de ces films était vitreuse, A. Thorel a montré qu'à proximité de la surface des grains, les films interfaciaux ont une structure ordonnée, partiellement cristallisée : lors de l'élaboration de la céramique à haute température, les tétraèdres SiO_4 de silice situés à proximité immédiate des grains de nitrure s'orientent sous l'action des forces de Van der Waals (forces à courte distance) induites par la structure atomique des grains. Un film mince est ainsi formé par un empilement ordonné de trois à quatre couches de tétraèdres de silice.

Dans le cas du sialon, ces films recouvrent préférentiellement les joints généraux et les stabilisent, abaissant leur énergie ; en revanche, les joints spéciaux, de basse énergie, sont dépourvus de film interfacial. Cette distribution résulte du bilan des forces ; à haute température, dans un tel film « liquide », deux types de forces agissent : des forces moléculaires attractives tendent à rapprocher les surfaces des grains adjacents, et une force de répulsion structurale apparaît en réaction à l'écrasement des couches de tétraèdres de silice. Dans les joints généraux, ces forces s'équilibrent, et le film est stable après refroidissement et solidification. Mieux, le film stabilise les joints généraux, car il permet une reconstruction locale entre les deux grains dont les réseaux ne coïncident pas. En revanche, dans les joints spéciaux, les forces d'attraction entre les deux grains sont particulièrement intenses, et le film se rétracte au cours du refroidissement.

De même que la viscosité d'un film d'eau augmente fortement pour des films aqueux très minces (où les forces à courte distance sont intenses), la viscosité des films interfaciaux silicatés est bien supérieure à celle d'une poche vitreuse massive (à température donnée). La structure organisée de ces films leur permet de résister à des contraintes normales et tangentielles et d'amortir les contraintes locales. Ainsi les expériences montrent qu'à température élevée et à volume de phase silicatée égal, les films interfaciaux maintiennent la contrainte à la rupture du matériau, alors que des poches vitreuses massives diminuent cette contrainte. En outre, des sialons avec des films interfaciaux ont une durée

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

de vie plus longue, quand on les utilise comme outils de coupe.

Lors de l'élaboration d'une céramique à base de sialon, pour des applications du type outils de coupe, les fabricants ont intérêt à éliminer les poches vitreuses et à favoriser l'apparition de films interfaciaux nanométriques, notamment par un traitement de pressage à chaud ; ils peuvent d'autre part recristalliser les poches vitreuses.

Les champs dans les grains

On espère que les champs et les courants critiques permettront de comprendre la supraconductivité.

Trois ans après la découverte de nouveaux matériaux supraconducteurs à haute température, l'étude de l'origine de leurs propriété piétine : il n'existe pas de théorie qui décrirait correctement les mécanismes physiques mis en jeu.

Deux principaux courants théoriques concurrents se développent depuis deux ans, et se sont affrontés, une fois de plus, lors de la dernière « grand messe » de la supraconductivité, en juillet 1989, à Stanford : certains physiciens tentent d'adapter aux nouveaux matériaux supraconducteurs la théorie classique de la supraconductivité (la théorie BCS) ; d'autres, aux côtés de Philip Anderson, prônent une théorie qui bouleverserait la physique du solide... si elle était mieux confirmée par les expériences.

La théorie de John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer – BCS est le sigle formé de leur initiales – décrit très bien la supraconductivité classique, telle qu'on l'observe dans la plupart des métaux. L'annulation de la résistance électrique, à très basse température, résulterait d'interactions entre des électrons et des « phonons » : un électron se propageant dans le réseau atomique le déforme et crée ainsi des phonons (des vibrations du réseau, que les physiciens du solide considèrent comme des particules), la variation, locale et transitoire, de la charge électrique dans le réseau dévie un deuxième électron qui arrive au même endroit. De ces deux interactions résulte une attraction entre les deux électrons, qui est la clef de la supraconductivité classique.

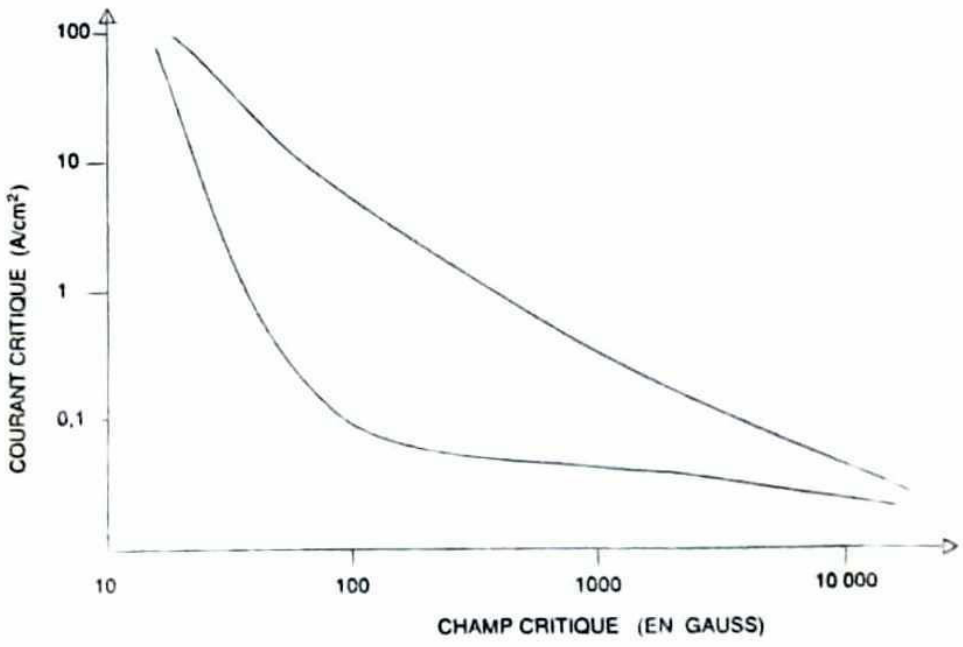
Cette description ne semblait pas expliquer la supraconductivité aux températures supérieures à 30 kelvins (–243 °C) ; or on a mesuré que, dans les nouveaux supraconducteurs, la longueur de cohérence (la distance maximale à laquelle deux électrons peuvent interagir) est très faible (environ une distance interatomique) ; la répulsion électrostatique entre les deux électrons est trop importante pour qu'ils puissent s'attirer, même grâce à des phonons.

Si l'on suppose que la répulsion entre les électrons est presque supprimée par un mécanisme encore inconnu, la théorie BCS décrit correctement les phénomènes observés, mais quel est ce mécanisme ? D'autre part, on a proposé que les électrons n'interagissent pas seulement par l'intermédiaire de phonons, mais peut-être plutôt grâce à des excitons ou des magnons (des quasi particules respectivement formées par association d'un électron et d'une lacune électronique, et par une onde de spin). Ces nouveaux porteurs de l'interaction attractive entre les électrons pourraient aussi rendre compte de l'intensité très forte de l'attraction, dans les nouveaux supraconducteurs. Cependant cette idée a été critiquée, notamment par P. Anderson : le problème crucial de la prise en compte de la répulsion entre les deux électrons n'est pas résolu pour autant.

P. Anderson a alors imaginé que la supraconductivité des oxydes résulte de phénomènes différents de ceux que considère la théorie BCS : la charge électrique et le spin, simultanément portés par les électrons dans les métaux, seraient portée par deux types distincts de particules respectivement appelées holons et spinons. Cette nouvelle règle du jeu de l'électronique des solides conduit alors à des possibilités nouvelles pour décrire la supraconduction dans des matériaux qui n'ont pas à être des métaux. Hélas les études expérimentales rapportées à Stanford ne semblent pas confirmer cette théorie.

L'absence d'une description fine des mécanismes physiques de la supraconductivité n'empêche nullement d'étudier les propriétés étonnantes des nouveaux matériaux. Cherchant des indices sur les mécanismes aujourd'hui inconnus, certains expérimentateurs ont étudié, en fonction du champ magnétique, le courant critique, au-delà duquel la résistance électrique du matériau n'est plus nulle. Selon le type de transition entre l'état supraconducteur et l'état conducteur, quand on fait varier le champ magnétique dans un supraconducteur, on distingue deux classes de matériaux ; certains comme l'oxyde d'yttrium, de baryum et de cuivre (YBaCuO), ont une transition brusque ; d'autres comme les composés au bismuth et au thallium ont une transition progressive.

Des physico-chimistes de l'École supérieure de physique et chimie industrielles et de l'Université de Tel



Le cycle d'hystérésis et la microstructure d'un échantillon d'YBaCuO.

Aviv ont récemment exploré ces transitions sur des échantillons d'YBaCuO préparées par Claude Lacour et Francine Laher-Lacour : en mesurant le courant critique en fonction du champ magnétique critique, Guy Deutscher, Michel Laguës et leurs collègues Uri Dai et Philippe Mocaër ont observé un phénomène d'« hystérésis » : le courant critique n'est pas identique, pour une même valeur du champ critique, quand le champ magnétique croît ou qu'il diminue *(voir la figure)*. En outre, ces variations du courant critique en fonction du champ critique dépendent fortement de la microstructure des échantillons.

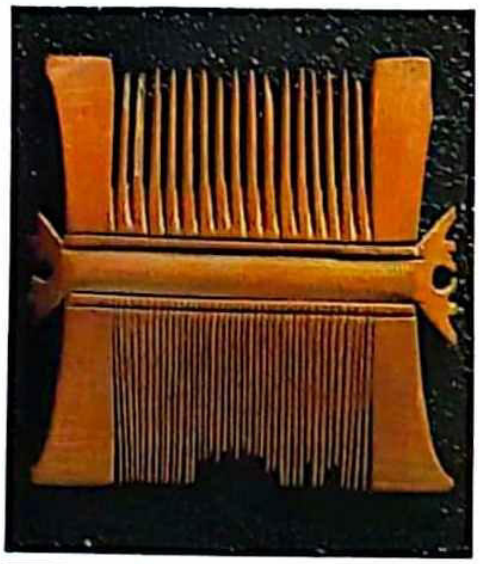
L'explication de ces deux observations est encore inconnue. Le champ magnétique, repoussé par le matériau supraconducteur, crée un fort courant électrique à la périphérie de l'échantillon, quand le champ est faible, puis dans des zones de plus en plus petites, quand le champ augmente. Lors de la diminution ultérieure du champ magnétique, une partie seulement de l'énergie associée à ces courants serait restituée. On suppose donc que la taille des grains limite l'ordre de grandeur des courants utilisables avec une résistance nulle.

Épouillage et génétique

On étudie les poux sur des peignes vieux de 2000 ans.

Si Saint François d'Assise considérait les poux comme les « perles de la pauvreté », les habitants du monde méditerranéen antique avaient une vision plus réaliste de *Pediculus capitis*. Pour se prémunir de toute invasion, les prêtres égyptiens pratiquaient une politique de la terre brûlée : ils se rasaient de la tête aux pieds. Les Romains connaissaient une méthode plus subtile, encore employée de nos jours : le peigne à poux.

Kostas Mumcuoglu, parasitologue à l'Université de Jérusalem, et Joseph Zias, conservateur au Département des antiquités d'Israel, ont trouvé des poux, dans toutes leurs étapes de développement, de l'œuf à l'adulte, sur un peigne exhumé à Qumran, c'est-à-dire près de l'endroit où furent découverts les manuscrits de la mer Morte. Une secte juive, les Esséniens,



Peigne à poux, en bois et pou prélevé sur un peigne du Ier siècle après J.-C. exhumé à Qumran.

habita cette région avant d'être décimée par les troupes romaines, en 68 après Jésus-Christ, lors de la première révolte juive. Les chercheurs exhumèrent huit peignes à poux dans des sites datant de la seconde révolte (132 à 135 après Jésus-Christ).

Selon K. Mumcuoglu et J. Zias, les Juifs utilisaient ces peignes pour se débarrasser des poux : ils se démêlaient tout d'abord les cheveux avec les larges dents d'un bord du peigne, puis s'épouillaient avec les dents plus fines de l'autre bord. Le procédé devait être efficace, car on a trouvé de nombreux poux brisés sur le peigne.

Ces poux ne nous renseignent pas seulement sur l'histoire de l'hygiène. J. Zias recherche un chirurgien suffisamment habile pour ouvrir les intestins de ces poux et en extraire d'éventuelles cellules sanguines humaines. Le noyau d'un seul globule blanc fournirait aux généticiens assez d'ADN pour que l'on puisse comparer les caractères de son antique donneur à ceux de la population juive actuelle. Cette comparaison préciserait les liens génétiques entre les deux populations et indiquerait les liens de parenté avec d'autres populations. Cette découverte pourrait enrichir la chronologie génétique que l'on a commencé à établir à partir de momies égyptiennes et Sud-américaines.

« Nous pourrions aussi cloner les poux eux-mêmes, dit J. Zias, leur aspect n'a pas changé, mais leur système biologique a peut-être évolué. » Comme les générations de poux se succèdent à un rythme hebdomadaire, ces modestes insectes ont acquis en 2000 ans, une expérience de l'Évolution bien supérieure à celle des êtres humains.

Anatomie d'une protéine

La diffraction des neutrons explore la structure d'une protéine membranaire.

Insérées dans la double couche lipidique qui constitue la membrane des cellules, les protéines membranaires ont des fonctions variées, essentielles à la vie de la cellule : pompage de molécules et d'ions, transduction de signaux... Ces protéines sont encore mal connues. Les nouvelles méthodes de génétique moléculaire révèlent leur séquence (l'enchaînement linéaire de leurs acides aminés), mais cette information à elle seule n'explique pas leur fonctionnement, faute de données sur leur arrangement dans l'espace.

La méthode usuelle par laquelle on détermine la position des atomes est la cristallographie : un rayonnement (généralement des rayons X) est envoyé sur un cristal, c'est-à-dire un édifice tridimensionnel où la protéine se trouve placée dans une position identique, à intervalles réguliers ; le rayonnement diffracté par le cristal forme un diagramme dont l'analyse indique la position des atomes dans l'espace.

Les protéines membranaires ne forment de cristaux tridimensionnels qu'en présence d'un détergent, et cela

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

très difficilement. La protéine, appelée bactériorhodopsine (BR) a beaucoup contribué à notre compréhension de la structure des protéines membranaires, parce qu'elle s'organise spontanément, *in vivo*, en un réseau cristallin bidimensionnel dans le plan de la membrane de la bactérie qui la produit. La BR comporte un groupe chimique, le rétinal, qui pompe des protons à travers la membrane bactérienne, en présence de lumière. Elle réalise ainsi une forme simplifiée de photosynthèse, transformant l'énergie lumineuse en énergie chimique utilisable par la bactérie (la molécule de rhodopsine, qui assure la vision chez les animaux, contient elle aussi une molécule de rétinal).

L'existence de cristaux bidimensionnels naturels a créé l'espoir de résoudre la structure de la BR dans son propre milieu. Cependant il n'existait pas de méthodes cristallographiques adaptées à ces cristaux plans. L'intérêt du problème a stimulé le développement de nouvelles approches structurales, notamment dans le domaine de la microscopie électronique et de la diffraction des neutrons.

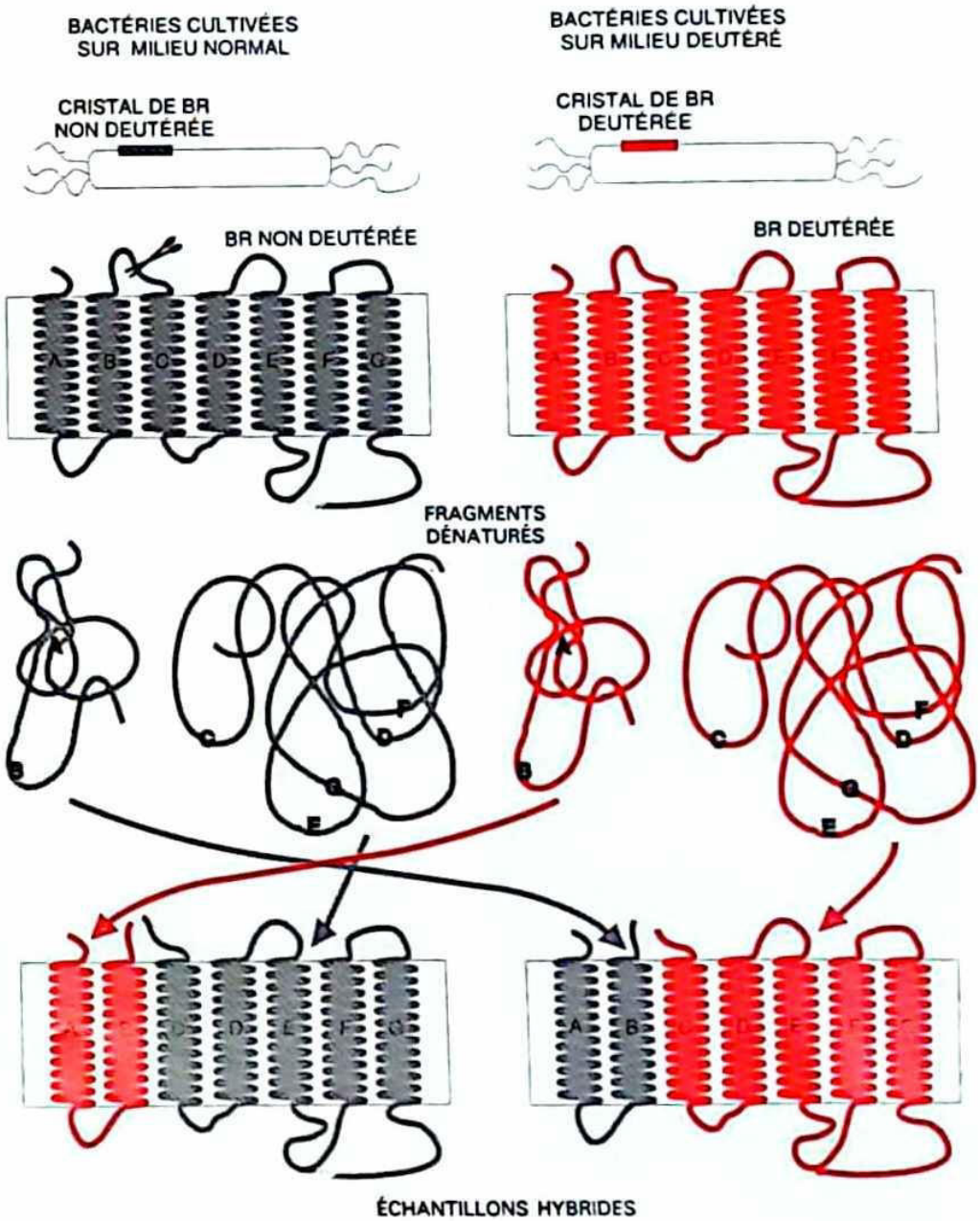
En analysant des images et des clichés de diffraction obtenus en microscopie électronique, Richard Henderson et Nigel Unwin, à Cambridge, ont obtenu en 1975 une carte relativement floue de la région transmembranaire de la BR. Celle-ci paraît formée de sept hélices alpha (1, 2 ...7) groupées en faisceau. Les hélices alpha sont un mode fréquent de repliement local des chaînes d'acides aminés : le polypeptide s'enroule en ressort à boudin, stabilisé par des liaisons hydrogène entre les spires.

En 1979, Gobind Khorana, à Boston, et Youri Ovchinnikov, à Moscou, ont déterminé la séquence en acides aminés de la BR. Elle comporte effectivement sept segments d'une vingtaine d'acides aminés hydrophobes (c'est-à-dire solubles dans les lipides), assez longs pour traverser une membrane sous forme d'hélice alpha (appelés *A, B, C,..., G)* : le rétinal est attaché au segment *G*. La résolution de la carte de R. Henderson et N. Unwin ne permettait cependant pas de distinguer les acides aminés individuels ni les boucles qui connectent les hélices alpha hors de la membrane ; on ne savait pas à quel segment de séquence correspondait chacune des hélices. On ne voyait pas non plus le rétinal.

La diffraction des neutrons a jeté un pont entre les informations biochimiques et l'image obtenue par diffraction des électrons. La diffraction des neutrons présente l'avantage que les neutrons sont déviés par les noyaux atomiques, alors que les rayons X et les électrons sont déviés par les électrons. Autrement dit, seuls les neutrons distinguent des isotopes d'un même élément chimique.

On tire parti de cette propriété en remplaçant certains atomes d'hydrogène par du deutérium, dont on détermine la position par diffraction ; un diffractomètre adapté a été construit au réacteur à haut flux de l'Institut Laue Langevin, à Grenoble. Les premières expériences effectuées dans l'eau lourde en 1979, ont démontré qu'il n'existe pas, au centre de la protéine, de canal rempli d'eau où les protons passeraient lors de leur pompage : ils traversent la membrane en se liant de façon transitoire soit aux acides aminés de la BR, soit à des molécules d'eau fortement liées.

En 1984, avec des collègues de Cambridge, nous avons incorporé du rétinal deutéré dans la BR en faisant pousser, en présence de rétinal deutéré, des bactéries dont la voie de synthèse du rétinal avait été bloquée. La molécule de rétinal a été localisée vers le milieu du faisceau d'hélices alpha. Le rétinal est une molécule allongée. En utilisant du rétinal deutéré spécifiquement à l'une ou l'autre de ses extrémités, Maarten Heyn et ses collègues de l'Université de Berlin ont ensuite déterminé son orientation : le rétinal est attaché soit sur l'hélice 2, soit sur l'hélice 6 de la carte de R. Henderson et N. Unwin. L'une ou l'autre de ces deux



Préparation d'échantillons hybrides de bactériorhodopsine dont seules certaines hélices alpha transmembranaires contiennent du deutérium.

hélices doit donc correspondre au segment *G* de la séquence.

Parallèlement, avec Don Engelman, de l'Université Yale, nous avons utilisé une approche différente : du deutérium a été introduit dans les acides aminés. Pour obtenir une deutération limitée à certaines hélices, nous préparons de la BR soit à partir d'une culture bactérienne non deutérée, soit à partir de cultures qui ont incorporé des acides aminés deutérés *(voir la figure)*. Dans chacune de ces préparations, nous enlevons chimiquement le rétinal et nous coupons la protéine (par une enzyme) entre les segments transmembranaires *B* et *C* (cette coupure ne perturbe pas la structure : quand on rajoute le rétinal, la protéine est fonctionnelle). Puis nous dénaturons la protéine coupée à l'aide d'acide formique : les deux fragments se séparent l'un de l'autre. On les purifie ; on mélange un fragment deutéré, par exemple celui qui contient les segments *A* et *B*, avec le fragment complémentaire non deutéré ; on ajoute le rétinal, des lipides, et on renature l'ensemble.

On fabrique ainsi des molécules de BR hybrides, comprenant un fragment deutéré, un fragment non deutéré et le rétinal. De plus, ces molécules reforment le cristal plan sans lequel les neutrons ne seraient pas diffractés. Nous avons vérifié en 1987, par des mesures spectroscopiques et cristallographiques, que la BR ainsi renaturée est indiscernable de la BR naturelle.

À partir des diagrammes de diffraction des neutrons par ces échantillons, en 1989, nous avons localisé les segments transmembranaires *A* et *B* dans la structure et proposé une position probable pour le segment *C*. Si l'on considère également les expériences antérieures, on en déduit que les sept hélices de la BR se suivent dans le sens des aiguilles d'une montre, sans s'enchevêtrer, comme un paravent à sept panneaux que l'on aurait replié en ovale. Chaque hélice présente aux lipides sa face la plus riche en acides aminés hydrophobes ; les résidus moins hydrophobes (polaires), tournés vers l'intérieur de la protéine, interviennent sans doute dans la stabilisation de la structure ou dans le pompage des protons. Des expériences de diffraction des électrons et de mutagenèse dirigée, dans d'autres laboratoires, devraient permettre de préciser encore cette structure.

Jean-Luc POPOT et Giuseppe ZACCAI

La Grande Muraille du cosmos

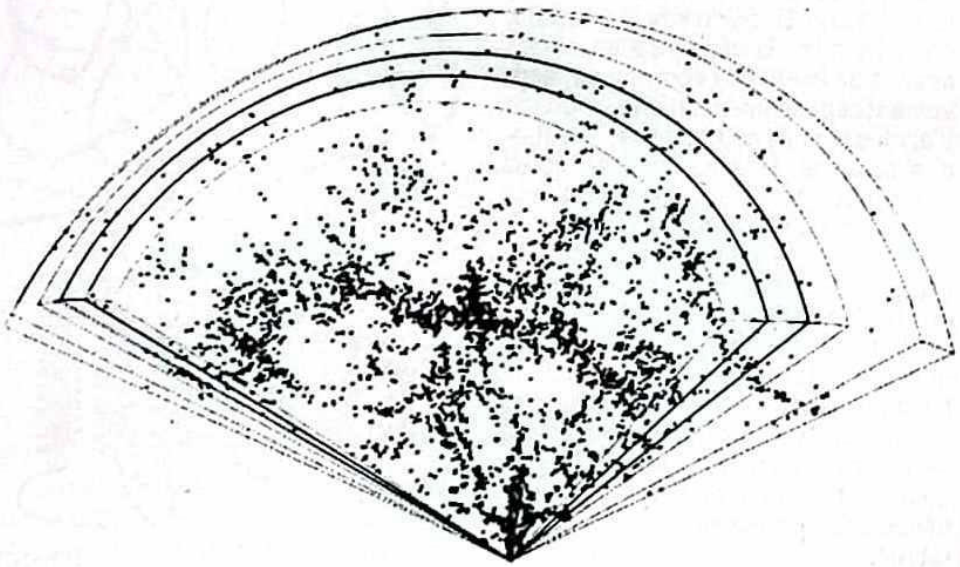
Répartition cosmique des galaxies et origine de l'Univers.

Deux astrophysiciens ont découvert une gigantesque « muraille » de galaxies de 500 millions d'années de lumière de longueur, qui représente la plus grande structure cosmique observée. Margaret Geller et John Huchra, du Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian de Cambridge, ont mis en évidence cette Grande Muraille en dressant la carte de la distribution des galaxies dans l'espace : cette découverte, ainsi que toute une série de découvertes récentes, indique que la répartition cosmique des galaxies n'est pas uniforme, et que l'Univers est organisé en amas plus complexes que les astronomes ne l'imaginaient ; elle conduit ceux-ci à réviser leurs modèles de la formation de l'Univers.

On découvrit en 1981 que la matière n'était pas uniformément répartie dans l'espace, même sur de très grandes échelles : Robert Kirshner et ses collègues, de l'université de Harvard, ont montré qu'une « bulle » de 100 millions d'années de lumière de longueur, baptisée le « Trou de l'Espace », est plus de cinq fois moins dense que la moyenne des galaxies. À l'opposé, la Grande Muraille est une structure environ cinq fois plus dense que la moyenne des galaxies ; elle est très longue mais peu épaisse – 15 millions d'années de lumière au maximum – et l'on ignore ses limites, car sa largeur est supérieure aux 200 millions d'années de lumière explorés par M. Geller et J. Huchra.

À mesure que l'on explorait des volumes d'espace supérieurs, on découvrait des structures de plus en plus grandes ; selon M. Geller et J. Huchra, « la taille des structures détectées est uniquement limitée par le volume d'espace exploré » ; or les examens de routine du cosmos ne couvrent qu'environ un cent millième du volume de l'Univers visible. M. Geller et J. Huchra découvriront probablement des structures encore plus grandes en poursuivant leur cartographie du ciel, qui devrait aboutir à l'enregistrement de près de 15 000 galaxies.

Des structures de la taille de la Grande Muraille sont un problème pour les modèles qui décrivent l'organisation de la matière lors de l'expansion de l'Univers. Ces amas de matière sont trop grands pour résulter des seules attractions gravitationnelles, si l'on admet que la matière était uniformément répartie aux premiers instants de l'Univers : on doit alors supposer que des amas de matière de taille significative étaient présents dès la naissance de l'Univers.



Cette carte tridimensionnelle des quatre « tranches » de cosmos récemment explorées indique la distribution des galaxies. Chaque tranche mesure 500 millions d'années de lumière d'épaisseur ; la bande horizontale de galaxies constitue la Grande Muraille.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

Le rayonnement thermique cosmologique, découvert en 1965, est constitué de rayonnements micro-ondes qui sont des vestiges du Big Bang : or aujourd'hui, ce rayonnement apparaît extrêmement uniforme dans le cosmos. Anthony Readhead et ses collègues, de l'Institut de technologie de Californie, ont montré que le rayonnement thermique cosmologique varie de moins de un pour 60 000 dans un angle de deux minutes d'arc. Si des amas de matière de taille importante ont existé dans l'Univers primitif, on observerait probablement des variations du rayonnement thermique cosmologique ; or on n'a jamais mis en évidence des variations suffisantes démontrant l'existence d'amas primitifs de taille notable. C'est pourquoi, dans l'espoir de détecter des irrégularités du rayonnement thermique cosmologique, les Américains ont lancé le 19 novembre 1989 un satellite astronomique appelé *Cobe (Cosmic Background Explorer)*, qui analysera finement le rayonnement thermique cosmologique au moyen de radiomètres et de spectrophotomètres très sensibles. Dans ce satellite, d'autres photomètres mesureront le rayonnement céleste infrarouge, qui est une trace de la lumière émise par les premières étoiles.

Comment une structure aussi gigantesque que la Grande Muraille a-t-elle pu se former à partir d'un Univers primitivement homogène ? Pour expliquer cette formation, les astronomes invoquent l'existence de la « matière sombre : celle-ci, formée de particules invisibles de nature inconnue, représenterait plus de 90 pour cent de la masse de l'Univers. Les astronomes justifient l'existence de la matière sombre par l'étude des mouvements des galaxies ; si la matière sombre existe réellement, les modèles du Big Bang prévoient que l'Univers serait suffisamment dense pour que son expansion cessât. Les amas de matière sombre ne modifieraient pas le rayonnement thermique cosmologique, mais ils seraient à l'origine des fortes attractions gravitationnelles qui guideraient la formation des galaxies.

Cependant même la matière sombre ne peut expliquer à elle seule la formation de structures aussi gigantesques que la Grande Muraille. Les théories qui proposent l'existence de particules sombres qui se déplacent lentement (la matière sombre et froide) ne justifient pas la formation de très grands amas, et les théories qui avancent l'existence de particules sombres qui se déplacent rapidement (la matière sombre et chaude) n'expliquent pas certaines propriétés locales de l'Univers.

La plupart des astronomes tentent de réviser leurs théories pour les adapter à ces récentes découvertes. D'autres, comme Jeremiah Ostriker, de l'Université de Princeton, élaborent des modèles qui s'affranchissent de l'existence énigmatique de la matière sombre. Tous reconnaissent néanmoins l'insuffisance des théories actuelles : selon M. Geller et de J. Huchra, la distribution filamenteuse des galaxies dans le cosmos est « un défi pour les défenseurs des théories classiques de l'origine de l'Univers ».

La faim justifie les moyens

La malnutrition explique-t-elle l'existence des bactéries lamarckiennes ?

Les biologistes les plus conformistes sursautèrent à la lecture des interprétations des expériences de John Cairns, de l'École de santé publique de Harvard : le fantôme de Jean-Baptiste Lamarck réapparaissait. En effet, ces expériences suggéraient que, dans certaines conditions, les cellules « choisissaient » les mutations qui leur conféraient un avantage adaptatif et évolutif. Cette hypothèse violait le principe de base de la génétique traditionnelle, selon lequel la fréquence d'une mutation est indépendante de sa valeur adaptative, et relançait la théorie de Lamarck, émise pour la première fois en 1809, mais discréditée depuis ; cette théorie prétendait que l'hérédité des caractères acquis guidait l'évolution des espèces.

L'interprétation des résultats obtenus par J. Cairns bouleversait les lois de la biologie moléculaire. Or, Bernard Davis, de l'École médicale de Harvard, vient de proposer une nouvelle explication de ces mutations non aléatoires, qui préserve les dogmes biologiques actuels.

Jean David, du Laboratoire de biologie et génétique évolutives du CNRS, à Gif-sur-Yvette, résume l'histoire des théories évolutives : « si, depuis Lamarck, l'évolution des êtres vivants est un fait de plus en plus admis, les mécanismes génétiques de l'Évolution, en revanche, restent assez incertains et controversés. Au début du XIXe siècle, Lamarck avait proposé un mécanisme simple et général, l'hérédité des caractères acquis. Plus tard, Charles Darwin privilégia ce qui, encore aujourd'hui, apparaît comme la cause essentielle de l'Évolution, la sélection naturelle de variants préexistants. À la fin du XIXe siècle, on expliquait la non-hérédité de l'acquis par la théorie de la séparation du soma (ensemble des cellules non reproductrices de l'organisme) et du germen (ensemble des cellules reproductrices). Selon cette théorie, l'environnement agit exclusivement sur le développement des caractères exprimés par l'individu, qui constituent son phénotype et qui affectent le soma ; le milieu n'a aucune influence sur le germen. Depuis le milieu du XXe siècle, on explique le même phénomène par le dogme central de la biologie moléculaire : les variations du phénotype (les protéines) ne peuvent se répercuter sur le génome (l'ADN).

« Cependant, tel le Phénix, le mythe lamarckien tend à renaître périodiquement de ses cendres. La théorie évolutive actuelle, ou théorie synthétique, est fondamentalement darwinienne. Elle suppose que les cellules subissent continuellement des mutations spontanées et aléatoires, et que la sélection naturelle, processus déterministe, élimine les mutants les moins bien adaptés à leur environnement. Néanmoins des auteurs proclament périodiquement la nécessité de processus évolutifs non darwiniens. Le dernier exemple est probablement constitué par le livre de Michael Denton : *L'Évolution, une théorie en crise*.

« La non-hérédité de l'acquis est, par essence, impossible à démontrer : mille échecs de la démonstration de l'hérédité de l'acquis seraient vains en regard d'une seule expérience lamarckienne positive. C'est en se fondant sur l'hypothèse d'une hérédité de l'acquis que Lyssenko, il n'y a pas si longtemps, a engagé la biologie soviétique dans une impasse dont elle eut beaucoup de mal à sortir. Il y a une dizaine d'années, E. Steele observa qu'une immunité acquise pouvait, chez le lapin, être transmise à la descendance par voie paternelle. Malheureusement ces observations ne furent pas confirmées. »

J. Cairns estimait que la théorie lamarckienne n'avait jamais été convenablement testée. Avec ses collègues, il a donc étudié une souche particulière de la bactérie *Escherichia coli* possédant un gène défectueux qui la rend incapable de digérer le lactose.

Quand les chercheurs ont cultivé cette bactérie défectueuse en présence de lactose, ils ont observé l'apparition, trop fréquente pour que seul le hasard fût en cause, de bactéries mutantes capables de digérer le lactose. Des processus lamarckiens obscurs semblaient induire les mutations responsables des caractères favorables.

Barry Hall, de l'Université de Rochester, fournit des preuves plus convaincantes de l'existence de mutations dirigées : il publie dans la revue *Genetics* des résultats montrant que des bactéries mutantes capables de digérer une molécule, la salicine, apparaissent quand on cultive ces bactéries dans un milieu contenant de la salicine. Or cette nouvelle aptitude ne peut résulter que de l'apparition de deux mutations spécifiques ; chacune de ces mutations est extrêmement rare et incapable à elle seule de conférer le nouvel avantage : la probabilité pour que le hasard seul produise l'aptitude à digérer la salicine est donc extraordinairement faible.

Ces découvertes ont bien entendu soulevé une controverse. Les erreurs d'interprétation ne sont pas exclues, et certains chercheurs soutiennent que J. Cairns et B. Hall se sont trompés. Néanmoins leurs expériences paraissent sérieuses, et le problème majeur est de concilier leurs observations avec les connaissances de la biologie moléculaire : pour cela, d'autres chercheurs prétendent que des mécanismes jusqu'à présent inconnus dirigent ces mutations avantageuses, peut-être en produisant des copies de gènes codant pour des protéines favorables. Ce flux d'information des protéines vers les gènes (l'inverse du parcours normal de l'information, qui va de l'ADN à l'ARN, puis aux protéines) contredit les lois biologiques fondamentales.

B. Davis propose une explication plus orthodoxe : les cellules privées de nutriments se tromperaient souvent en répliquant leur information génétique. Il suggère que les cellules affamées métaboliseraient leurs propres protéines pour produire de l'énergie. Si les enzymes de réparation de l'ADN figuraient parmi les protéines détruites, les mutations seraient plus fréquentes. Comme les bactéries en conditions naturelles sont souvent affamées, B. Davis soupçonne la malnutrition d'être un outil puissant stimulant leur évolution.

Il souligne aussi que lorsque les gènes sont transcrits puis traduits en protéines, l'ADN abandonne provisoirement sa configuration de double brin solide et se présente alors sous la forme d'ADN simple brin. Cet ADN simple brin serait plus sensible aux dommages et aux mutations, si bien que les gènes actifs subiraient davantage de mutations que les gènes inactifs. Dans le cas des expériences de J. Cairns, B. Davis pense que le lactose induit la séparation d'une partie des gènes défectueux bactériens en ADN simple brin, favorisant ainsi les mutations qui affectent les gènes responsables de la digestion du lactose.

Le débat sur l'origine des mutations fait toujours rage. Selon J. David : « il est tout à fait remarquable de voir apparaître, à la fin du XX[e] siècle, des expériences lamarckiennes positives. La théorie synthétique de l'Évolution attribue actuellement au hasard un rôle de plus en plus grand, non seulement dans l'apparition des mutations, mais aussi dans l'apparition et l'extinction des populations naturelles, et peut-être également dans la naissance des espèces. Une certaine proportion de mutations dirigées pourrait faire contrepoids au développement des idées actuelles. »

J. Cairns souligne le fait que ses propres expériences réfutent la théorie de B. Davis ; il doute également de la véracité du mécanisme proposé par B. Davis parce que celui-ci repose sur l'idée, jamais démontrée, que les mutations affectent davantage les gènes qui sont transcrits puis traduits en protéines. De nouveaux mécanismes continuent d'être proposés. La biologie moléculaire ressuscitera-t-elle Lamarck ?

Pesticides et environnement

Comportement des pesticides dans le sol et risques de contamination.

Depuis l'Antiquité, les agriculteurs cherchent à protéger leurs récoltes des fléaux que sont les parasites et les ravageurs. L'emploi d'agents chimiques, les pesticides (insecticides, fongicides, herbicides, raticides...), a remplacé dans cette lutte les techniques manuelles ancestrales. Cependant la toxicité de ces agents chimiques n'est jamais absolument sélective vis-à-vis des ennemis des cultures, et l'utilisation des pesticides n'est pas sans dangers. Le nombre de ces agents a considérablement augmenté au cours de ces dernières décennies ; en France, on utilise plus de 400 produits actifs et le marché phytosanitaire français est au premier rang européen et au troisième rang mondial, derrière les États-Unis et le Japon.

Trois facteurs déterminent ces risques de contamination : le comportement (stabilité et mobilité) du produit dans le sol, les pratiques agricoles (notamment les doses utilisées), et la toxicité propre du pesticide.

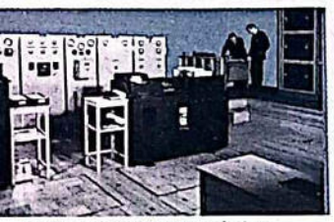
Les risques de dispersion dans l'environnement dépendent du comportement physico-chimique et biologique des produits dans le sol : Paul Jamet, Lucien Kerhoas et leurs collègues du Département de phytopharmacie de l'INRA à Versailles, étudient les phénomènes de transfert, d'immobilisation et de dégradation des molécules de pesticides dans le sol. Le sol se comporte comme un filtre actif et sélectif : il dégrade certaines molécules et en retient d'autres.

Les transferts de pesticides dans l'atmosphère par le vent, d'importance minime, sont souvent réduits par l'enfouissement des produits après leur épandage. Plus importants sont les transferts de produits toxiques à la surface des sols, par ruissellement : ils contribuent à la pollution des eaux de surface ou des sédiments et sont d'autant plus importants que l'épandage est fait sur le sol nu, que les précipitations sont abondantes, et que le terrain est en pente. Les transferts dans le sol même, liés à l'infiltration des eaux de pluie et d'irrigation et au déplacement de cette eau dans le sol risquent de polluer les eaux de surface et les eaux souterraines ; l'importance de ces transferts augmente avec la solubilité des molécules dans l'eau, l'abondance des pluies, la perméabilité des sols, et le recours aux techniques d'irrigation et de drainage. Par ailleurs, l'efficacité et la sélectivité d'un traitement dépendent de la répartition de la matière active dans le sol : ainsi un herbicide non sélectif peut être toxique pour la plante cultivée s'il est entraîné jusqu'au système racinaire.

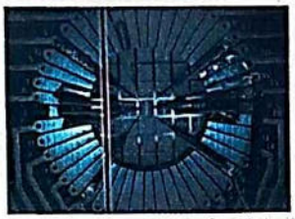
La mobilité dans le sol est évaluée en laboratoire par chromatographie sur couches minces ou sur colonnes de sol ; on suit la fixation de molécules marquées au carbone 14 pour comparer leur mobilité dans différents types

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

MAITRISEZ L'INFORMATIQUE ET SES APPLICATIONS!



1951 : Mise en service de Léo, premier ordinateur de gestion.

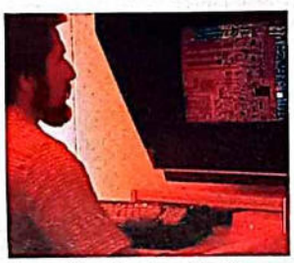


Détail d'une puce. Leur fragilité est si grande que 70 % d'entre elles sont endommagées au moment même de leur fabrication!

1981 : Une chaîne de fabrication Apple II, un des premiers succès commerciaux dans le grand public.

Disques de silicium, sortant du four. Avec chacun d'entre eux, des milliers de puces vont pouvoir être fabriquées.

Le disque à lecture laser, ou l'informatique au service de la musique...



Conception de micro-circuits sur tablette graphique à l'aide d'un crayon optique.

Déjà, les ordinateurs de bord équipent la plupart des automobiles. Bientôt, des liaisons par satellite permettront le contrôle du trafic!

LA PUCE: PRODIGE DE LA MINIATURISATION

① La mémoire morte de la puce contient les instructions stockées pour exploiter le calculateur.

② La mémoire vive, rentre en fonction uniquement pendant la durée du traitement.

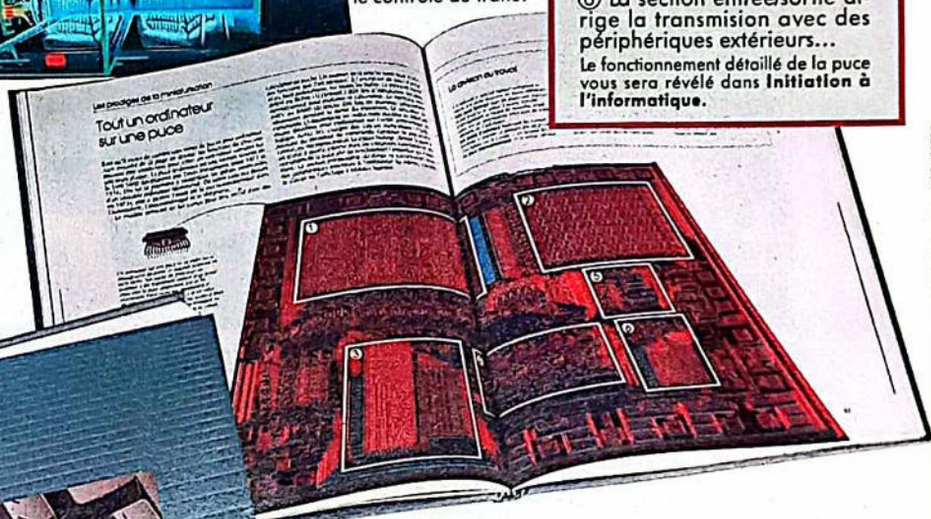
③ Le décodeur de commande décompose les instructions en étapes détaillées pour l'exploitation par l'UAL.

④ L'UAL: unité arithmétique et logique, chargée des calculs, elle constitue le microprocesseur central de la puce.

⑤ Le circuit horloge relie la puce à un cristal à quartz externe, il synchronise l'ensemble du traitement.

⑥ La section entrée/sortie dirige la transmision avec des périphériques extérieurs...

Le fonctionnement détaillé de la puce vous sera révélé dans **Initiation à l'informatique.**



EDITIONS TIME LIFE

GARDEZ CES 2 LIVRES EN PAYANT SEULEMENT LE SECOND!

EN EXAMEN GRATUIT CHEZ VOUS PENDANT 10 JOURS!

LE MONDE DES ORDINATEURS: TOUT, TOUT, TOUT SUR L'INFORMATIQUE ET SES APPLICATIONS QUOTIDIENNES.

Aucun instant de notre vie n'échappe au traitement informatique: écrire, calculer, gérer, illustrer, communiquer, voyager, créer... Voici pourquoi TIME-LIFE a conçu LE MONDE DES ORDINATEURS: une collection unique pour découvrir, comprendre et perfectionner vos connaissances sur l'informatique et ses applications dans votre vie de tous les jours.

Pour que vous puissiez découvrir tout l'intérêt que présente cette nouvelle collection, pour vous, pour vos enfants... pour votre avenir professionnel, votre culture personnelle; **TIME-LIFE vous fait profiter d'une offre exceptionnelle**: vous recevez le premier volume de la collection: **Initiation à l'informatique** en cadeau, accompagné du second volume: **Les langages de programmation** en examen gratuit pendant 10 jours.

Pour recevoir ces 2 volumes, sans aucun engagement, retournez dès maintenant le bon d'examen gratuit ci-dessous!

© 1990 TIME LIFE BOOKS B.V. TIME LIFE BOOKS B.V. 6. Ottho Heldringstraat, 1066 AZ Amsterdam. RCS 155782

Dans chaque volume du MONDE DES ORDINATEURS:
- 128 pages en couleur, format 23,5 x 28 cm, superbement reliées.
- Des centaines de photos, de schémas, un glossaire et un index.

GRATUIT!

POUR VOUS

Ce très beau boulier chinois, en bois verni, reproduction fidèle d'un objet millénaire. Jusqu'au 17ème siècle, il fut le seul outil de calcul utilisé par l'homme...

BON D'EXAMEN GRATUIT

EDITIONS TIME LIFE

à retourner rapidement sous enveloppe non affranchie à TIME-LIFE INTERNATIONAL, libre réponse n° 6798, 75385-08 Paris Cedex

OUI, je souhaite recevoir pour un examen gratuit de 10 jours, les volumes **Initiation à l'informatique** et **Les langages de programmation**, avec mon cadeau: le boulier chinois, si je réponds avant 8 jours. Si je décide de garder ces 2 volumes, je paierai seulement le second et vous règlerai la facture qui l'accompagne soit 169 F (+ frais d'envoi 18 F). Vous m'enverrez par la suite les volumes suivants de la collection à raison d'un livre toutes les 6 semaines environ, toujours pour un examen gratuit de 10 jours.
Je ne suis pas tenu d'acheter un nombre minimum de livres et peut interrompre ma collection à tout moment sur simple courrier. Si ces 2 volumes ne répondent pas exactement à ma demande, je vous les retournerai dans les 10 jours suivant leur réception, vous cesserez alors toute autre expédition et je ne vous devrai rien.

INSCRIVEZ EN MAJUSCULES VOS NOMS ET ADRESSE F2ZAWB9

☐ Mme ☐ Mlle ☐ M.

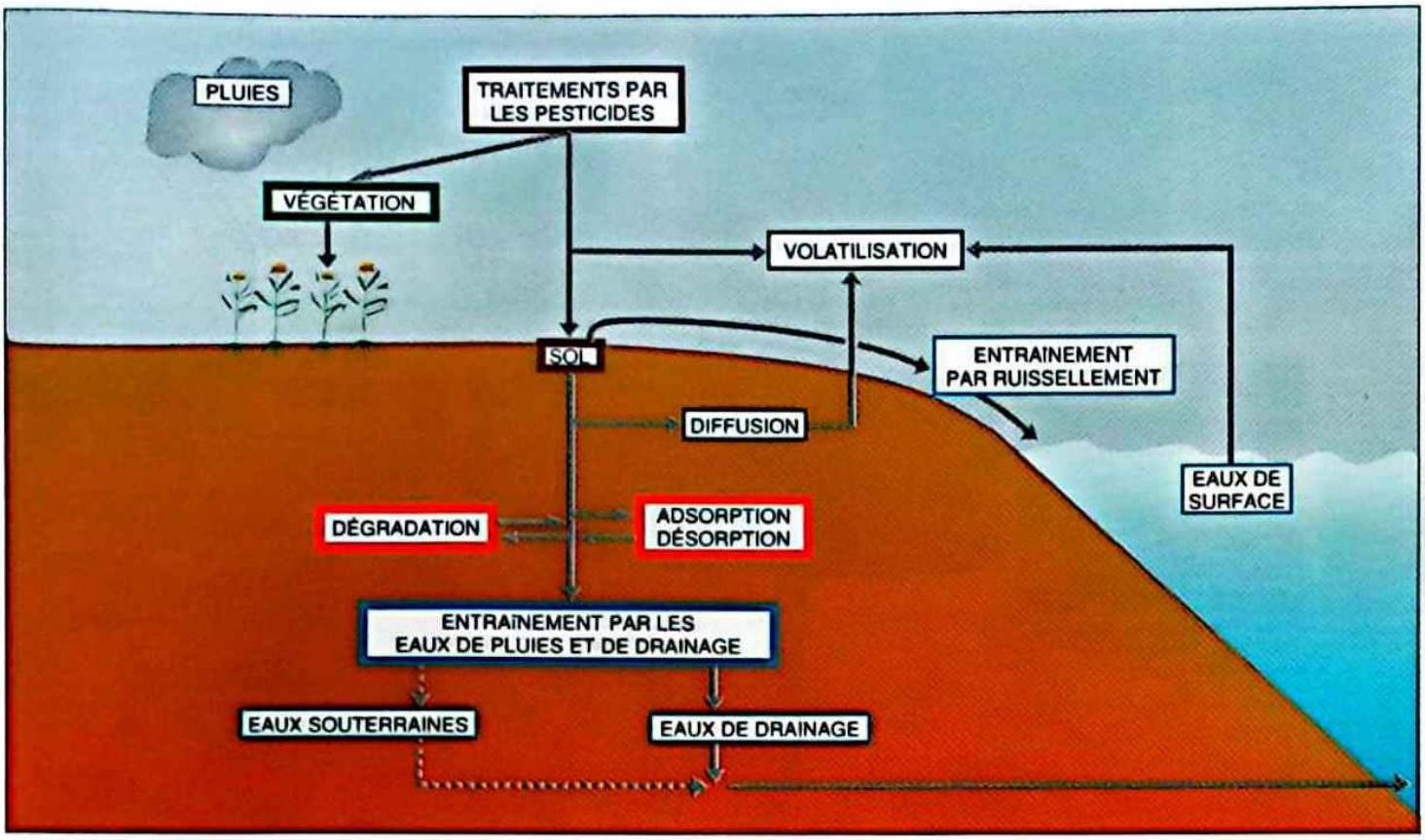
Nom _____ Prénom _____

N° _____ Rue _____ Code postal |_|_|_|_|_|

Ville _____

N° de tél: |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_| (facultatif)

Signature obligatoire:



Le comportement biologique et physico-chimique des pesticides dans le sol détermine en partie les risques de contamination de l'environnement.

de sol (on distingue même entre les isomères et les divers métabolites d'un pesticide). À l'extérieur, des dispositifs permettant d'étudier la circulation de l'eau dans le sol, tels que les microlysimètres (cylindres de fer de 20 centimètres de diamètre sur 60 centimètres de profondeur, enfoncés dans le sol), ou les cases lysimétriques, de plus grande taille, sont traités en surface par un pesticide radioactif et soumis aux pluies naturelles : on mesure alors l'action simultanée de la mobilité et de la dégradation dans des situations proches des conditions réelles.

L'immobilisation des pesticides dans le sol, qui résulte essentiellement de leur adsorption sur la matière organique ou sur les argiles du sol, diminue leur efficacité biologique, réduit leur dégradation, diminue leur mobilité et réduit ainsi les risques de pollution des eaux.

La détoxification par le sol est parfois efficace : elle résulte principalement de l'activité microbiologique (un gramme de sol contient entre dix millions et un milliard de microorganismes). La dégradation produit des métabolites moins toxiques, et finalement des molécules minérales (H_2O, CO_2, NH_3) ; elle réduit la persistance des produits dans le sol et limite ainsi la pollution de ces sols, des végétaux cultivés et des milieux aquatiques. Toutes les pratiques culturales et toutes les conditions climatiques qui assurent le maintien et le développement de la microflore du sol, favorisent la détoxification. Les produits toxiques qui ont des temps de demi-vie (temps nécessaire à la disparition de 50 pour cent du produit) très longs – de l'ordre de plusieurs années – comme la plupart des organochlorés, ont été interdits en France depuis 1972, sauf le lindane. On détermine au laboratoire la nature chimique des métabolites et les cinétiques de dégradation, pour estimer les temps de demi-vie. Pour cela, on utilise des échantillons de sol fraîchement prélevés, et placés dans des conditions favorables au développement de la microflore, que l'on traite avec un pesticide radioactif ; on identifie les composés volatils et les résidus subsistant dans le sol, par chromatographie et par spectrométrie de masse. Quand les demi-vies estimées au laboratoire se révèlent importantes, on effectue des études « en plein champ » sur des parcelles expérimentales pour évaluer le devenir du produit dans les denrées récoltées.

Dans le cadre de la procédure d'homologation des pesticides, qui conditionne leur autorisation de mise sur le marché, les industriels remettent un volumineux dossier toxicologique au ministère de l'Agriculture ; ce dossier constitue la première source d'informations sur la toxicologie et le comportement d'une molécule de pesticide dans les sols, les plantes et les animaux. C'est pourquoi Éliane de Lavaur, Paul Jamet, Françoise Millet et Marie-Claire Poupard, à Versailles, ont réalisé une base de données informatisées, nommée *Agritox*, sur la toxicologie des pesticides. *Agritox* contribuera à une meilleure information du public sur la toxicologie, l'écotoxicologie et les dispositions administratives relatives à chaque pesticide commercialisé en France.

Ainsi, les risques de dispersion d'un pesticide dans l'environnement sont liés à la nature du sol, aux conditions climatiques, aux pratiques culturales et à la nature de la molécule. Le législateur interdit les produits les plus toxiques ou les plus persistants. Le sol est « la plaque tournante de la dissémination des molécules » : la protection des sols, qui nécessite des pratiques culturales appropriées, limite la dispersion des pesticides dans l'environnement, et réduit notamment les risques de pollution des milieux aquatiques.

Colloques

Pharmacologie clinique : Actualités et perspectives
Recent trends in clinical pharmacology
G. STRAUCH, J.M. HUSSON
Coédition INSERM/ John Libbey (1)
Double version : française et anglaise
Colloque, version française
1989, vol. 185, 250 FF

A paraitre :*Symposium, english version*
1989, vol. 186, 21 £, 41 US$

Facteurs de croissance et oncogènes
M. BOLLA, E.M. CHAMBAZ, C. VOUSOS
Coédition INSERM/John Libbey (1)
1989, vol. 190, 222 pages, 360 F

Biomembranes et nutrition
C.L. LEGER, G. BEREZIAT
1989, vol. 195, 574 pages, 350 F

La santé mentale comme observable : Regards sur la santé mentale et la folie
Coordonnateur P. BEUF
1989, vol. 192, 568 pages, 350 F

Biologie de la peau : 5° cours francophone
J. THIVOLET, M. FAURE
1989, vol. 201, 310 pages, 170 F

A paraître

La vaccination contre l'hépatite B
P. COURSAGET
Coédition INSERM/John Libbey (1)
Vol. 194

Aspects actuels des carences en fer et en folates dans le monde
S. HERCBERG, H. DUPIN
Vol. 197

Collection "Recherches en... /Research in..." Series

Coédition INSERM/John Libbey (1)
Deux versions : française et anglaise
Hypertrophie et insuffisance cardiaques/Cardiac hypertrophy and failure
B. SWYNGHEDAUW, éditeur
Relié, environ 800 pages, 50 tableaux, 180 figures, 2800 références
Prix de souscription jusqu'au 28 février 1990 : 550 F

Collection "Audition"

Coédition EM Inter INSERM/SFA (2)
Psychoacoustique et perception auditive
M.C. BOTTE, G. CANEVET, L. DEMANY, C. SORIN
1989, 180 pages, 225 F

Collection "Statistiques de santé"

Evolution de la mortalité par cancer en France (1950-1985)
C. HILL, E. BENHAMOU, F. DOYON, R. FLAMANT
1989, 340 pages, 240 F

A paraître

Incidence des cancers dans les départements du Bas-Rhin, du Calvados, de la Côte d'Or, du Doubs et de l'Isère
E. BENHAMOU, A. LAPLANCHE, M. WARTELLE

Les ouvrages en coédition sont à commander auprès des coéditeurs aux adresses indiquées ci- dessous :
(1) John Libbey Eurotext Ltd 6 rue Blanche 92120 Montrouge - France
13 Smiths Yard - Summerley Street London SW18 4HR England
(2) EM Inter Allée de la Croix-Bossée 94234 Cachan

Les éditions INSERM 101 rue de Tolbiac 75654 PARIS Cedex 13

Hors collection

Comités d'éthique à travers le monde :
Recherches en cours 1986, 85 F
Recherches en cours 1987, 98 F
Recherches en cours 1988, 98 F

LES EDITIONS INSERM

Un dictionnaire informatique des synonymes

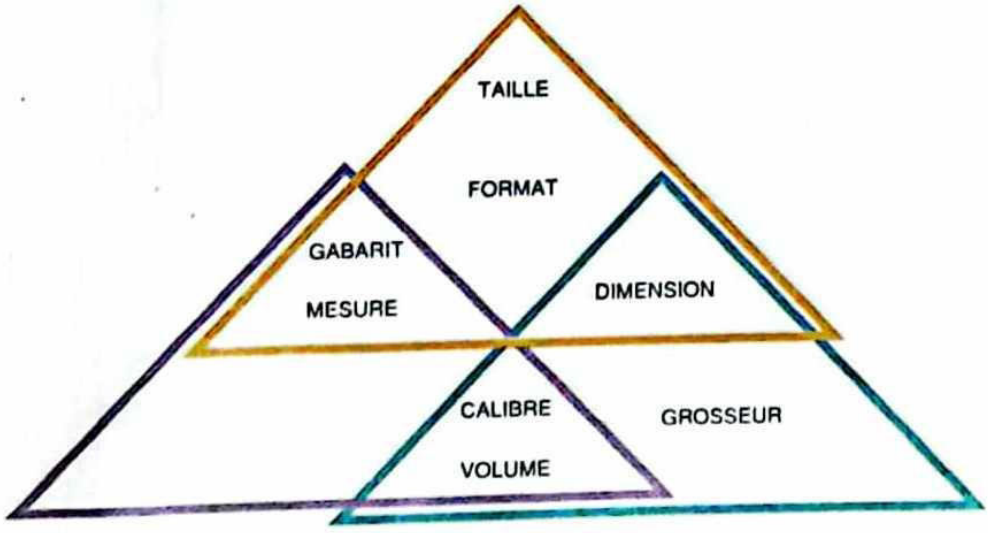
Les nuances sémantiques quantifiées.

Les dictionnaires contiennent nombre d'informations qui sont le fruit d'une longue tradition de compilations et de mises à jour. Celles-ci conduisent à des incohérences qui ne perturbent pas notre lecture, mais qui sont pénalisantes pour les applications informatiques traitant le langage naturel : synthèse et reconnaissance de la parole, analyse de contenu, traduction assistée par ordinateur, etc. À l'aide d'outils mathématiques et en tenant compte des phénomènes linguistiques, Isabelle Warnesson et son équipe de chercheurs du Centre scientifique d'*IBM-FRANCE*, restructurent des dictionnaires en des bases de connaissances linguistiques, cohérentes, logiques et structurées ; ces recherches ont débuté par la modélisation d'un dictionnaire des synonymes.

Parmi les incohérences structurelles de certains dictionnaires, tout à fait gérables dans un environnement humain mais dommageables dans un cadre purement automatisé, citons la non-systématisation de la symétrie : le mot *village*, par exemple, possède un certains nombre de synonymes parmi lesquels figure *commune* ; en revanche, le mot *commune*, n'a pas *village* pour synonyme. D'une manière générale, si *A* est synonyme de *B*, alors *B* devrait être synonyme de *A*. Par ailleurs, si *A* a pour synonyme *B*, et si *B* a pour synonyme *C*, alors *A* devrait avoir pour synonyme *C* (transitivité). En termes mathématiques, une relation vérifiant les propriétés de réflexivité, de symétrie et de transitivité s'appelle une loi d'équivalence. La modélisation doit trouver la relation d'équivalence qui s'ajuste au mieux à la relation de synonymie proposée par le dictionnaire de base. Retraçons les étapes de cette recherche.

En partant d'un dictionnaire de base de 27 000 entrées, on a dénombré 37 000 synonymes différents, soit un écart qui pose un problème : pour rétablir l'équilibre, les entrées doivent figurer en tant que synonyme et réciproquement ; cette lacune a été comblée par l'adjonction des 10 000 entrées manquantes, permettant ainsi de passer à l'étape suivante, l'élimination des ambiguïtés.

Un mot est ambigu quand une même forme graphique recouvre plusieurs significations : ce sont les phénomènes de polysémie et d'homonymie. Par exemple, l'adverbe *simplement* signifie *sans façon* ou *seulement*, suivant le contexte ; on note alors deux entrées différentes : *simplement-1* (sans façon) et *simplement-2* (seulement). Les 37 000 entrées initiales deviennent ainsi 60 000 « entrées sens ». Chacune de ces entrées est dotée de sa liste de synonymes et, à l'échelle du dictionnaire dans son entier, on relève 161 000 relations synonymiques qui à cette étape sont encore ambiguës car si l'on sait que *simplement-2* a pour synonyme *seulement*, on ignore de quelle « entrée sens » de *seulement* il s'agit, car *seulement* est lui-même une entrée polysémique. Afin d'éliminer ces ambiguïtés, on extrait, pour chaque « entrée sens », l'environnement qui est en amont (mots dont elle est synonyme) et en aval (ses synonymes). On calcule ensuite un indice de similarité pour chaque couple de mots (en fonction des similarités et des différences de leur liste de synonymes) qui indique leur degré de proximité : quand cet indice est proche de zéro on considère que les deux mots sont sans rapport, quand il est proche de l'unité, leur relation est très étroite. En fonction de ces indices attribués on construit pas à pas un agrégat pour chaque « entrée sens » ; à une entrée initiale, on rattache le mot qui a l'indice de similarité le plus fort : on forme alors une entité avec ces deux mots puis on recalcule les indices de similarité et l'on rattache, à l'entité précédente, le mot qui a l'indice le plus fort. On procède ainsi, de proche en proche, pour tous les mots de l'environnement. On écarte les mots dont les indices sont inférieurs à un seuil fixé ; ces mots correspondent à des relations synonymiques erronées (liens abusifs) ou à des lacunes dans les données de base (liste de synonymes incomplète, sens manquant).



Le traitement informatique des synonymes dégage trois informations sémantiques complémentaires : le triangle rouge regroupe les dénominations générales du concept de taille, le triangle bleu, le concept de taille dans l'espace et le triangle vert donne l'expression des mesures sous forme de norme.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

Deux acceptions d'un même mot attirent naturellement deux agrégats différents : autour de *simplement-1*, naîtra un agrégat illustrant le concept de simplicité, autour de *simplement-2*, celui d'unicité. Comme *seulement-2* est intégré dans l'agrégat de *simplement-2*, on identifie automatiquement le sens correct de *seulement*. Après ce traitement, l'algorithme a levé 90 pour cent des ambiguïtés, mais on n'a pas encore changé la structure du dictionnaire.

Pour optimiser la relation d'équivalence, on représente les relations synonymiques sous forme matricielle : on construit un tableau symétrique dont les « entrées sens » constituent les éléments des lignes et des colonnes ; à leurs intersections, on matérialise la synonymie par un « 1 » et la non-synonymie par un « 0 ». Un tel tableau est une matrice carrée de 3,6 milliards de cases (le nombre d'« entrée sens » au carré), soit un ensemble trop volumineux à traiter, même par un système informatique puissant. Cette matrice est extrêmement creuse (sur 3,6 milliards de cases, il n'y a que 161 000 « 1 ») ; c'est pourquoi, afin de minimiser le traitement, on extrait les sous-ensembles qui ne sont pas connectés au reste et qui sont les divers champs sémantiques formalisés par le dictionnaire : les composantes connexes.

Chaque composante connexe va être soumise au processus d'optimisation qui consiste à regrouper au sein de classes homogènes les mots qui se ressemblent tant par leurs relations synonymiques que par leur opposition consensuelle aux autres mots de la composante connexe ; cela revient, dans la sous-matrice, à construire des carrés à forte densité de « 1 » répartis le long de la diagonale et environnés de blocs à forte densité de « 0 ». La méthode mathématique employée pour ce classement est l'analyse relationnelle : après son utilisation, la structure du dictionnaire a changé. L'« entrée sens » *maison*, par exemple, et ses 35 synonymes, de *demeure* à *lieu* en passant par *adresse*, donne une partition optimale en six classes dont chacune restitue une information sémantique particulière : la classe qui contient les mots *demeure*, *domicile*, *adresse*, fait référence à des dénominations administratives ; la classe contenant *abri*, *refuge*, *retraite*, *asile* met en évidence une notion de protection, la classe de *nid*, *toit*, *logis*, *foyer* dénote un aspect affectif, etc. Ainsi nous avons obtenu la relation d'équivalence définie par la classe synonymique optimale.

Des techniques parallèles permettent de compléter cette analyse pour obtenir finalement un partitionnement d'une composante connexe en classes empiétantes *(voir la figure)* plus proche de la réalité sémantique : les polysémies implicites dans le dictionnaire de base se révèlent alors explicitement. Ce nouveau type de dictionnaire pourra être utilisé par un ordinateur, les relations modélisées seront dès lors exploitables par la machine. Cette organisation conceptuelle des classes de synonymes se révélera bien utile, même sous forme imprimée.

Diagnostic immunitaire

On dénombre directement les marqueurs cellulaires des fonctions immunitaires.

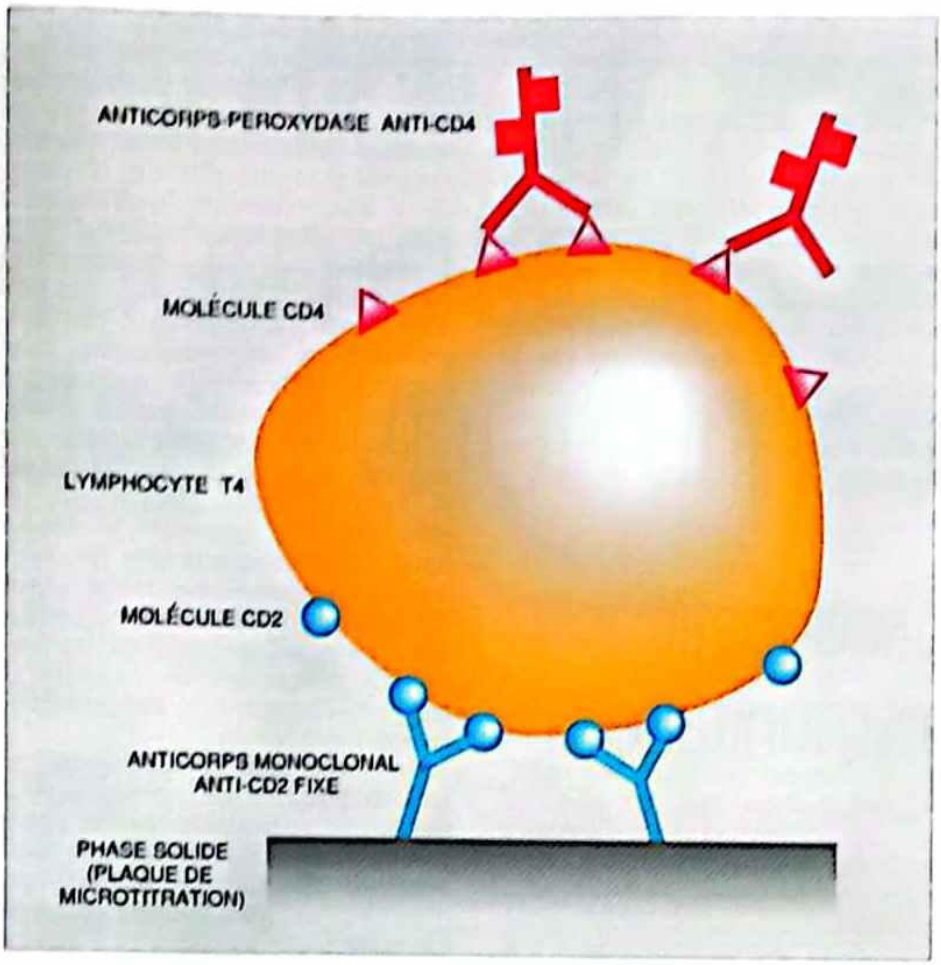
Les fonctions immunitaires assurent la défense des organismes contre les agents pathogènes : elles dépendent de cellules spécialisées, notamment des lymphocytes *T* qui sont les piliers du système immunitaire. Les lymphocytes *T* présentent à leur surface des associations moléculaires caractéristiques, ou marqueurs, qui participent à leurs fonctions ; les concentrations de certains de ces marqueurs caractérisent le statut immunitaire d'un individu. Chez l'Homme, l'évaluation du statut immunitaire permet le suivi de l'évolution de certaines maladies, comme le SIDA, caractérisé par un déficit immunitaire fonctionnel. Aussi est-il important d'appécier ce statut : Dominique Carrière, Claude Fontaine et Bernard Pau, des Laboratoires de *Sanofi Recherche*, ont mis au point, en collaboration avec *Diagnostics Pasteur*, une technique de mesure du statut immunitaire rapide, sensible et automatisable, qui améliore les techniques traditionnelles.

Pour évaluer le statut immunitaire d'un individu, on dénombre classiquement les sous-populations de lymphocytes *T* présents dans le sang ou dans les tissus inflammatoires et les organes lymphoïdes. Comme ces sous-populations sont morphologiquement indiscernables, on utilise pour les reconnaître des anticorps monoclonaux qui se fixent spécifiquement sur les marqueurs de surface caractéristiques des différentes sous-populations : on repère ces marqueurs en couplant les anticorps à des enzymes qui produisent des réactions colorées, ou à des molécules fluorescentes ; enfin l'on compte les différents types de lymphocytes sous microscope, ou l'on mesure la fluorescence des cellules à l'aide d'un appareil, le cytofluorimètre. Ces dénombrements sont longs et difficilement compatibles avec les exigences de standardisation. La nouvelle méthode mise au point par les chercheurs de *Sanofi Recherche* et de *Diagnostics Pasteur* est un immunodosage permettant la mesure directe des concentrations de marqueurs fonctionnels des lymphocytes *T* ; cette méthode est standardisée, elle affranchit l'opérateur de l'obligation de dénombrement cellulaire et facilite le diagnostic de l'immunodéficience fonctionnelle.

Il existe deux grands types de lymphocytes *T* : les lymphocytes *T* auxiliaires ou lymphocytes *T4*, et les lymphocytes *T* cytotoxiques ou lymphocytes *T8*. Les lymphocytes *T4* détectent l'antigène étranger présenté à la surface des lymphocytes *B* ou des macrophages et activent alors les lymphocytes *B* (qui produisent des anticorps dirigés contre cet antigène), les monocytes et les macrophages (qui détruisent les agents pathogènes), et les lymphocytes cytotoxiques. Les lymphocytes *T8* détectent l'antigène étranger sur les cellules infectées par un virus ou une bactérie, tuent alors ces dernières et stimulent d'autres cellules cytotoxiques.

Les lymphocytes *T4* présentent à leur surface des marqueurs qui les distinguent des autres lymphocytes *T* : les molécules CD4. Les molécules CD4 participent activement aux interactions des lymphocytes *T4* avec les cellules présentatrices de l'antigène, interactions qui déclenchent la réaction immunitaire. En outre, les molécules CD4 servent de récepteur aux virus VIH, et l'infection par le VIH provoque la disparition des lymphocytes *T4* puis l'effondrement du système immunitaire, conduisant au SIDA. De même, les molécules CD8 constituent des marqueurs spécifiques des lymphocytes *T8* et participent aux interactions des lymphocytes *T8* avec les cellules infectées présentant l'antigène. Ainsi les molécules CD4 et les molécules CD8 sont à la fois des marqueurs et des molécules fonctionnelles qui caractérisent respectivement les lymphocytes *T4* et les lymphocytes *T8*.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990



Lymphocyte *T4* fixé sur un support solide et dont les molécules CD4 sont marquées avec un anticorps.

À l'aide du bioréactif de *Diagnostics Pasteur*, on mesure les concentrations en molécules CD4 et CD8 membranaires des lymphocytes *T* sanguins. Dans ce réactif, certains anticorps monoclonaux fixent spécifiquement les lymphocytes *T* sur une phase solide, et d'autres anticorps monoclonaux, couplés à une enzyme qui catalyse une réaction colorée, marquent soit les molécules CD4 soit les molécules CD8 des lymphocytes *T4* ou *T8*.

L'opérateur isole la totalité des lymphocytes circulants (et quelques monocytes) par centrifugation sur gradient de densité d'un échantillon de 0,5 millilitre de sang. Puis les lymphocytes *T* sont immobilisés dans des microcupules (la phase solide) par des anticorps monoclonaux adsorbés sur ces cupules et reconnaissant les molécules CD2 qui caractérisent l'ensemble des lymphocytes *T* ; simultanément les lymphocytes *T4* ou les lymphocytes *T8* sont indépendamment marqués par des anticorps monoclonaux anti-CD4 ou anti-CD8 couplés à l'enzyme, la peroxydase. Les microcupules sont centrifugées et lavées ; l'activité de la peroxydase est révélée par un réactif : une réaction colorée se produit et l'opérateur mesure l'absorbance lumineuse, à 490 nanomètres, des produits colorés de chaque microcupule.

On relie les absorbances mesurées aux concentrations en molécules CD4 ou CD8 en se référant à deux droites d'étalonnage (correspondant respectivement à l'anticorps anti-CD4 et à l'anticorps anti-CD8) : chacune d'elles est tracée à partir des valeurs des absorbances de quatre microcupules contenant quatre doses d'une lignée de lymphocytes *T* humains qui présentent en moyenne 30 000 molécules CD4 et 40 000 molécules CD8 à leur surface.

Les études de validation de cette méthode montrent que le milieu sanguin n'interfère pas avec l'immunodosage, et que les concentrations en molécules CD4 et CD8 sont corrélées avec les dénombrements des cellules qui expriment les molécules CD4 et CD8. La limite de sensibilité est actuellement d'environ une picomole par litre (ce qui représente environ 40 lymphocytes *T4* par microcupule) : elle est comparable à la sensibilité de la cytofluorimétrie. La reproductibilité de cette méthode, supérieure à 90 pour cent, est comparable à celle des immunodosages classiques, et sans doute supérieure à celle de la cytofluorimétrie, grâce à la standardisation par l'étalonnage interne. La stabilité des cellules-étalon est d'au moins huit mois.

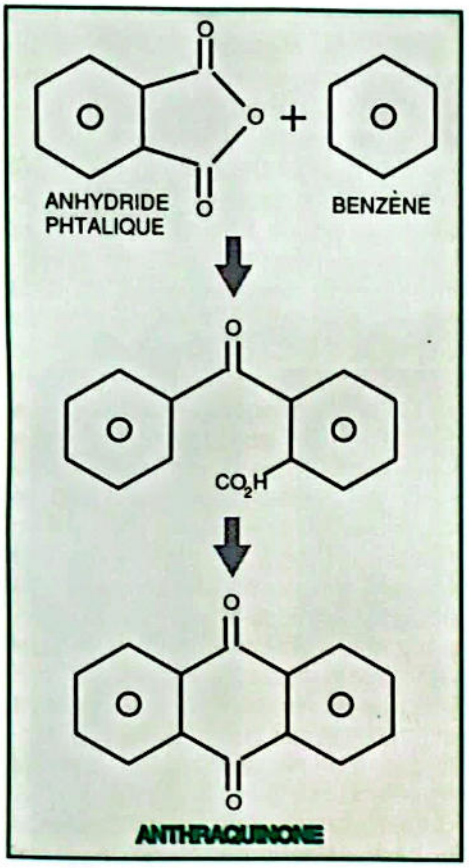
L'évaluation des concentrations en molécules CD4 et CD8, chez des sujets sains et chez des patients séropositifs ou atteints du SIDA, indique que les sujets sains présentent une large dispersion des valeurs des concentrations en molécules CD4 (de 10 à 50 picomoles par litres) avec une moyenne de 24 picomoles par litre ; les séropositifs et les sujets atteints du SIDA présentent une diminution significative des concentrations en molécules CD4 : en moyenne, 13 picomoles par litre pour les séropositifs, et 4 picomoles par litre, avec des valeurs très regroupées autour de cette moyenne, pour les patients atteints du SIDA. Les concentrations en molécules CD8 ne sont pas discriminantes. Ces résultats s'accordent avec la déplétion spécifique des lymphocytes *T* qui caractérise l'infection par le VIH.

Cette étude, effectuée avec le bioréactif de *Diagnostics Pasteur*, permet de définir la valeur-seuil de la concentration en molécule CD4 qui caractérise l'entrée en déficit immunitaire fonctionnel : elle est environ de 10 picomoles de molécules CD4 par litre de sang, qui représentent 400 lymphocytes *T4* par millimètre cube de sang, valeur considérée jusqu'alors comme critique.

Synthèse sans solvant

Un nouveau procédé de synthèse de l'anthraquinone.

L'anthraquinone est un composé de base dans la fabrication des colorants, mais son coût, par le procédé actuellement en vigueur, limite le développement d'autres applications, comme la délignification de la pâte à papier. On la synthétise aujourd'hui en oxydant (par l'oxygène ou par l'acide nitrique) l'anthracène provenant des goudrons de houilles. Des chimistes ont mis au point un nouveau procédé consistant à faire réagir l'anhydride phtalique avec du benzène *(voir la figure 1)* : en présence d'acide fluorhydrique et



1. Synthèse classique de l'anthraquinone.

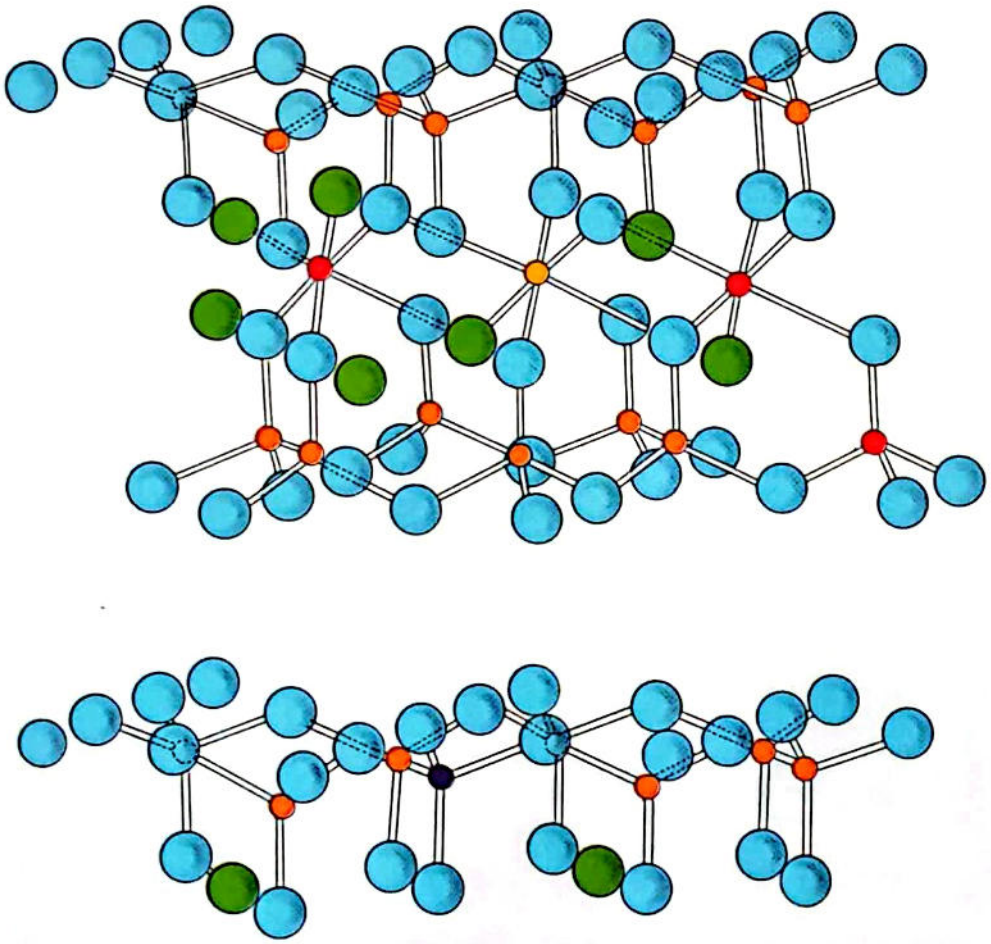
de trifluorure de bore, on obtient de l'acide orthobenzoylbenzoïque que l'on transforme en anthraquinone, par action d'acide sulfurique concentré. Ce procédé est efficace, mais peut-on l'améliorer ? Comment éviter notamment les rejets d'acide sulfurique ?

Avec Michel Devic, du Centre de recherche *Atochem* de Pierre-Bénite, Georges Bram, André Loupy, Mustapha Majdoub et Alain Petit, de l'Université d'Orsay, ont étudié un procédé de synthèse de l'anthraquinone sans solvant. Ils ont d'abord trouvé une argile (de la classe des bentonites) qui adsorbe l'acide orthobenzoylbenzoïque (on mélange simplement l'argile et l'acide, tous deux sous forme de poudre) et catalyse la formation de l'anthraquinone, par chauffage à 350 degrés ; après 30 minutes, le rendement de réaction atteint 90 pour cent.

Initialement ils ont effectué la réaction dans un appareillage mis au point au Centre de recherche d'*Atochem* : dans un bain de métal en fusion, ils disposaient une coupelle en acier inoxydable où s'effectuait la réaction ; l'anthraquinone formée se sublimait et se resolidifiait sur la face inférieure d'une seconde coupelle, pleine d'eau.

Cependant le chauffage dégradait la microstructure des bentonites, qui perdaient alors leurs propriétés catalytiques ; après un cycle de réaction, le rendement chutait, et la régénération était impossible. En outre, les argiles naturelles ont une qualité très variable.

L'équipe d'Orsay a donc amélioré le procédé : ils réalisent aujourd'hui la synthèse à l'aide de micro-ondes, dans un four domestique : la réaction ne dure que cinq minutes. Activée par les micro-ondes, les argiles conservent leur activité catalytique pendant une quinzaine de cycles et un lavage dans un solvant organique les régénère ensuite complètement.



2. Structure feuilletée de l'argile où l'on synthétise l'anthraquinone. Les atomes d'oxygène sont en bleu, ceux de silicium en orange, ceux d'aluminium en rouge et ceux de magnésium en jaune, et les groupes hydroxyles sont en vert. Le feuilletage permet l'adsorption des composés, et les atomes métalliques confèrent au matériau ses propriétés catalytiques.

Un stylo à ADN

Preuve irréfutable.

Chaque individu possède un code génétique qui lui est propre, à l'exception des vrais jumeaux qui ont des génomes identiques. L'ADN qui le compose est la carte d'identité infalsifiable, mais aujourd'hui inaccessible, de chacun. La Société *Bioprobe Systems* a conçu un « génome artificiel » spécifique de chaque individu qui le souhaite et garant de son identité.

L'ADN double brin est un enchaînement de nucléotides appariés, où la thymine est liée à l'adénine, et la cytosine, à la guanine. Les chercheurs de cette société synthétisent des brins simples d'ADN constitués de 50 nucléotides, dont la séquence est engendrée aléatoirement par un ordinateur dont ils ont conçu le programme. Ce brin d'ADN en solution est « l'encre » d'un stylo, le *Biopen*, qui sert de dispositif d'authentification.

Après avoir conçu une séquence originale de nucléotides, l'ordinateur en pilote la synthèse, sélectionnant chaque nouveau nucléotide qui doit être incorporé dans la molécule synthétisée. Les molécules synthétiques ainsi élaborées comptent 50 maillons, et la probabilité que deux chaînes de 50 éléments soient identiques est inférieure à 10^{-30} (on a moins d'une chance sur 10^{30} d'obtenir deux séquences aléatoires identiques).

Cet ADN synthétique est spécifique de son propriétaire, qui peut apposer sa signature sur une petite membrane en nylon ; on utilise cette membrane

synthétique, car le papier fixe mal les nucléotides et ne résiste pas aux solutions aqueuses dans lesquelles on plonge la membrane au cours des phases ultérieures du procédé. Afin d'authentifier une œuvre ou un document, le propriétaire signe avec le stylo à ADN sur la membrane dont il est le seul à connaître l'emplacement.

Lorsqu'il s'agit de réaliser une expertise ou d'authentifier un document, la Société *Bioprobe Systems*, qui conserve toutes les séquences synthétisées pour ses clients, crée une séquence synthétique complémentaire de la séquence avec laquelle le propriétaire a signé le document. On dépose, sur la membrane, une solution contenant les séquences complémentaires, et une enzyme qui permet de détecter l'hybride formé par les deux brins complémentaires d'ADN : après révélation, l'hybride est coloré et le tracé en couleur correspond à celui de la signature. La révélation a éventuellement lieu en présence d'un huissier.

Le microscope confocal

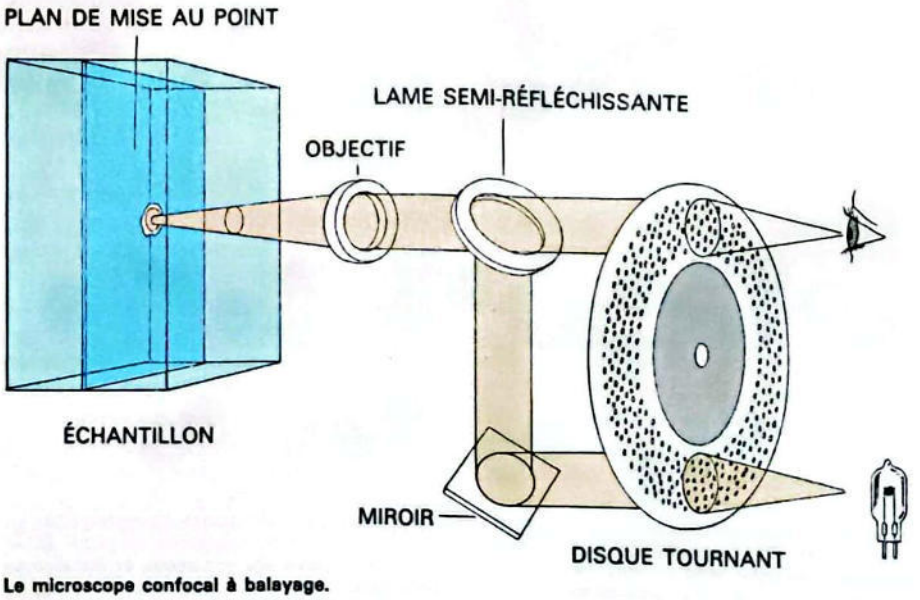
Des images reconstituées en trois dimensions.

Les principaux handicaps de la microscopie optique sont la faible profondeur de champ et le faible contraste, surtout lorsqu'on examine à fort grossissement des objets présentant un relief. Un système de microscopie optique à balayage, en lumière blanche, mis au point par *Tracor France*, réduit notablement ces inconvénients. Il ne recueille que la lumière issue d'une très petite zone de l'objet, et élimine toute lumière parasite diffusée par les zones environnantes : les images sont plus contrastées que dans les microscopes traditionnels, mais la profondeur de champ est encore plus réduite. En couplant le microscope à un analyseur d'image, on élabore des images en trois dimensions et on restitue une grande profondeur de champ. Cette technique est particulièrement intéressante pour les études de surface, en science des matériaux, et pour l'observation des objets à l'intérieur d'une coupe mince translucide, en biologie.

Dans un système confocal, le plan image d'un premier objectif coïncide avec le plan objet d'un second objectif. On obtient la même configuration optique quand la lumière effectue un aller et retour à travers le même objectif ; dans la configuration optique utilisée et représentée sur la figure, le plan objet de l'objectif au trajet aller est constitué par un disque percé de minuscules ouvertures réparties selon des figures particulières. Le faisceau incident d'éclairage passe à travers ces ouvertures, est dévié par une lame semi-réfléchissante, passe à travers l'objectif et donne une image, dans le plan de mise au point de l'objectif, qui consiste en une centaine de points. Seuls les points éclairés de l'échantillon situés dans le plan de mise au point renvoient la lumière qui repasse, en retour inverse dans l'objectif pour donner une nouvelle image sur une autre zone du disque tournant où les ouvertures de sortie correspondent aux ouvertures d'entrée. Afin de recueillir l'image de tous les points de l'échantillon dans le plan de mise au point, le disque tourne entre 500 et 1500 tours par minute : les positions successives des ouvertures balayent toute la section optique. Puis en empilant les images planaires obtenues on reconstitue une image en trois dimensions ; en moins d'une minute, on acquiert les 60 sections d'une image tridimensionnelle.

Bien que le principe du microscope confocal soit connu depuis près de 40 ans, de nombreux problèmes ont contrarié sa mise au point. C'est grâce à des techniques de photolithographie que l'on peut aujourd'hui élaborer un disque percé de 13 000 ouvertures carrées de 50 micromètres de côté (disque de Nipkow), réparties en spirales, pour qu'à chaque ouverture d'« entrée » corresponde une ouverture symétrique de « sortie », avec une précision de l'ordre du micromètre. De plus, en microscopie confocale utilisant une lumière blanche, il faut tenir compte des aberrations chromatiques. En traversant des milieux dispersifs, la lumière blanche se décompose en longueurs d'onde qui sont focalisés en des points différents de l'axe optique ; dans les microscopes optiques, on compense ces aberrations en groupant des lentilles de propriétés optiques différentes. En microscopie confocale, la profondeur de champ autorisée est trop faible pour que ces compensations puissent être efficaces, aussi utilise-t-on un filtre passe-bande afin d'obtenir une lumière aussi monochromatique que possible.

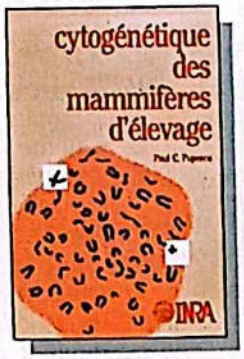
La position du plan de mise au point est controlée par la position de l'objectif qui est piloté par un appareil piézoélectrique sur une profondeur de 50 micromètres, avec un pas minimal de 10 à 20 nanomètres. Connaissant l'altitude de chaque point de l'objet, un logiciel construit des cartes topographiques des objets ou élabore des images en trois dimensions, avec une profondeur de champ comparable à celle d'un microscope électronique. Les images étant numérisées, on peut les orienter dans l'espace (les reconstructions prennent entre cinq et 20 secondes), coder les altitudes en couleurs, introduire un éclairage artificiel (effet de Soleil) ou même produire des images stéréoscopiques dont le relief est restitué par des lunettes adaptées.



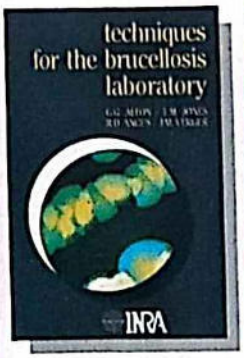
Le microscope confocal à balayage.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

sciences biologiques



AVRIL 1989 : 110 FF



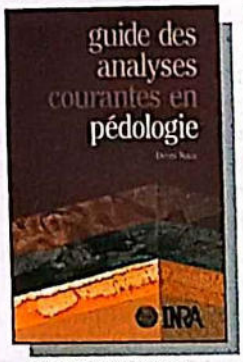
JANVIER 1989 : 195 FF

MAI 1987 : 170 FF

JOUVE - PARIS

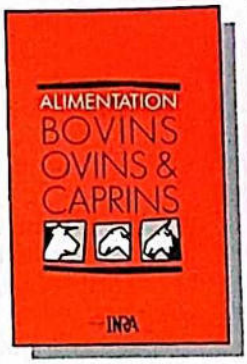
Envoi de catalogue sur demande

sciences agronomiques

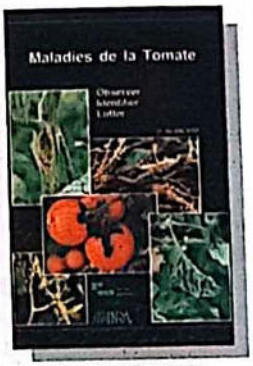


JANVIER 1989 : 100 FF

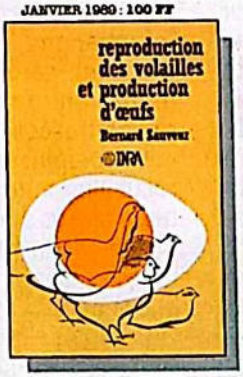
FÉVRIER 1989 : 180 FF



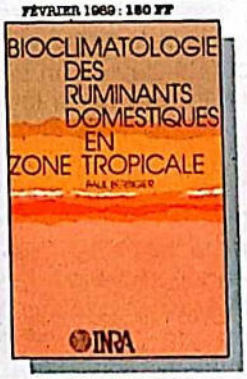
MARS 1988 : 180 FF



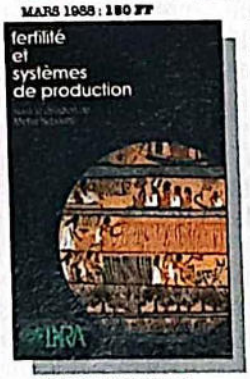
JANVIER 1989 : 545 FF



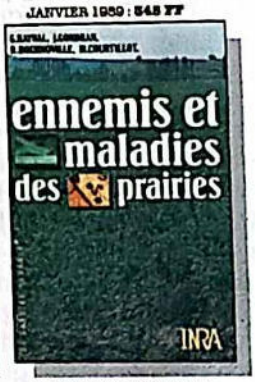
FÉVRIER 1988 : 190 FF



NOVEMBRE 1988 : 95 FF

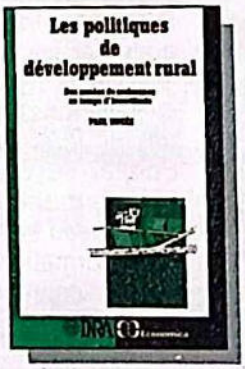


FÉVRIER 1989 : 215 FF



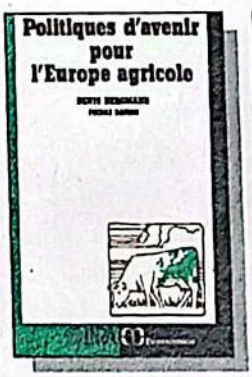
SEPTEMBRE 1989 : 280 FF

sciences sociales



MAI 1989 : 150 FF

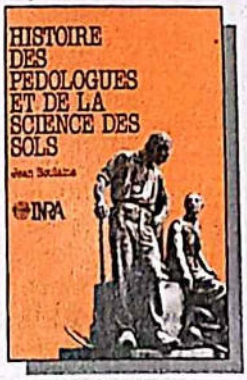
MAI 1989 : 175 FF



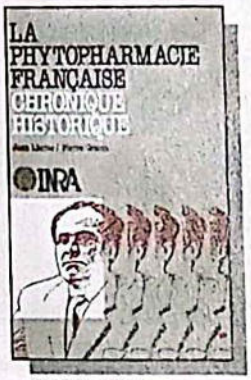
FÉVRIER 1989 : 98 FF

AVRIL 1989 : 110 FF

histoire des sciences



JANVIER 1989 : 110 FF



MARS 1989 : 180 FF

INRA
Editions
Route de Saint-Cyr
78000 VERSAILLES
Institut National de la Recherche Agronomique

L'ordinateur copilote

L'optimisation des itinéraires routiers.

Routes encombrées, réfections de la chaussée, sens interdits, accidents, bouchons... Comment peut-on les éviter ? Les premiers systèmes d'aide à la conduite automobile ont fait leur apparition, et les ingénieurs de la Société *Renault* ont déjà conçu leurs prochains modèles équipés de ces systèmes informatiques qui fonctionneront en temps réel.

La réalisation d'un système d'aide à la conduite automobile assistée par ordinateur nécessite plusieurs conditions : on doit disposer d'une banque de données numériques très complète où figurent les différentes routes, les carrefours, les attributs localisés le long des routes (stations service, hôtels et restaurants...), les agglomérations et, en ville, les noms des rues, les sens interdits, les interdictions de tourner à droite ou à gauche...

Pour obtenir ces banques de données, il faudra numériser la France et l'Europe. L'Institut géographique national et la Société *Michelin* qui possède déjà, grâce à ses guides, de multiples renseignements utiles à l'automobiliste, participent à la numérisation du réseau routier de la France. Ces données devront être actualisées régulièrement et on devra trouver un compromis entre le nombre d'informations, qui doit être le plus élevé possible pour satisfaire les exigences de l'utilisateur, et la fréquence de leur actualisation : plus le nombre de données est élevé, plus celles-ci sont caduques (le prix de l'essence dans les stations service, les tarifs des restaurants...).

La Société *Bosch* propose déjà un système d'aide à la conduite : un écran rapporté sur le tableau de bord affiche la position du véhicule sur une carte de la région. Ce système de lecture n'est pas dénué de risques puisque le conducteur doit regarder l'écran pour se localiser. Les Sociétés *Philips*, *Renault*, RPIC, *Sagem* et TDF *(Télédiffusion de France)* ont voulu améliorer le système, et ils cherchent à obtenir le guidage par une voix de synthèse qui indiquerait la route à suivre ; un petit écran permettrait de positionner le véhicule sur une carte à plus grande échelle, et la précision serait de l'ordre de dix mètres en rase campagne ; cette carte ne serait accessible au conducteur qu'à l'arrêt du véhicule.

Au sein du programme *Demeter*, les Sociétés *Philips* et *Bosch* ont mis au point un format de numérisation commun qui rendra compatibles les bases de données recueillies par les différents organismes qui utilisent tous le même format.

Le système *Carminat*, conçu par les Sociétés *Philips*, *Renault*, RPIC, SAGEM et TDF, n'a pas pour seul objectif d'offrir au conducteur des informations routières, urbaines, touristiques ou commerciales figées et stockées sur des disques laser, mais il devra guider le conducteur et optimiser son trajet, afin que celui-ci évite les encombrements, les zones où sont réalisés des travaux ou celles où un accident vient de se produire. Un tel système fonctionnera en temps réel. On indiquera à l'ordinateur où l'on veut se rendre : grâce aux données stockées, celui-ci donnera un premier trajet, qui sera sans arrêt optimisé en fonction des nouvelles données parvenant au véhicule.

Les informations extérieures seront transmises au système informatique embarqué, par l'intermédiaire du système « RDS » de radiodiffusion des données *(Radio Data System)* : les informations stockées sur le disque compact seront traitées instantanément en fonction des données radiodiffusées.

La plupart des informations sont recueillies automatiquement : des capteurs placés sur les routes enregistrent par exemple sans arrêt la densité de la circulation, et transmettent ces informations automatiquement à un calculateur qui vérifie l'origine et l'adresse du message. La retransmission locale est ensuite assurée par les émetteurs de TDF. Au contraire, les accidents par exemple, sont communiqués par les gendarmes présents sur les lieux de l'accident. Toutes les informations sont transmises aux centres de la circulation de Rosny-sous-Bois et de Créteil ; elles seront réémises sur une bande de fréquence et un créneau RDS : selon la localisation, les informations collectées proviendront d'émetteurs différents puisque seules comptent, pour un véhicule donné, les informations concernant un périmètre de quelques kilomètres.

Les ingénieurs de *Renault* testent actuellement un prototype de ce système d'aide à la navigation automobile, sur l'axe Paris-Rennes qui a déjà été numérisé. Cette phase d'expérimentation permettra d'évaluer le coût et le bien-fondé de ce système informatique d'aide à la conduite. Simultanément ils évaluent sa résistance en le soumettant à des conditions difficiles comme des températures très basses ou au contraire très élevées, ou encore à des décharges électrostatiques et magnétiques intenses simulant les orages. ■

L'ordinateur de bord affiche *(en blanc)* le trajet le plus direct qui relie Suresnes à Malakoff ; en appuyant sur les touches « zoom » on visualise des chemins secondaires. La touche « i » fournit diverses informations routières, notamment la densité du trafic.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

BON DE COMMANDE

à renvoyer avec votre règlement à :
Pour la Science, 8, rue Férou 75006 Paris
sous enveloppe affranchie

Veuillez m'adresser ⌊__⌋ paires de reliures de **POUR LA SCIENCE** (6 numéros par reliure – 2 reliures par an).

Prix de la paire : France : 70 F
Autres Pays : 80 F

Montant total de ma commande : _____

Je vous envoie ci-joint mon règlement par :

☐ Chèque à l'ordre de **POUR LA SCIENCE.**

☐ Carte Bleue N° ⌊____⌋ ⌊____⌋ ⌊____⌋ ⌊____⌋

Date d'expiration _____
Signature (obligatoire) :

M. Mme Mlle Nom _____

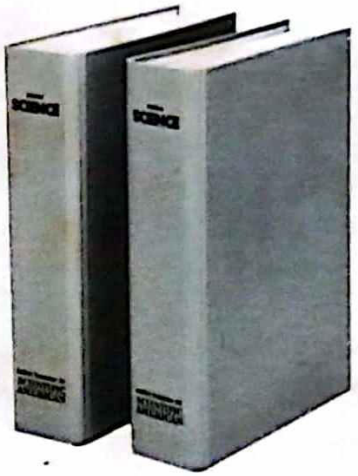
Prénom _____

Adresse complète _____

_____

Code Postal ⌊_____⌋ Ville _____

Pays _____



LES RELIURES DE POUR LA SCIENCE : LE MOYEN LE PLUS PRATIQUE DE CONSERVER VOS NUMÉROS DE POUR LA SCIENCE

Robustes, élégantes, sobres... les reliures de **POUR LA SCIENCE** ont été créées spécialement pour conserver et protéger vos numéros de **POUR LA SCIENCE** de la manière la plus élégante et la plus efficace possible.
Elles s'intégreront parfaitement à votre bibliothèque et vous permettront d'avoir toujours sous la main les anciens numéros de la plus prestigieuse revue scientifique au monde... en édition française.

BULLETIN PERSONNEL D'ABONNEMENT

Oui, je désire bénéficier de l'offre exceptionnelle d'abonnement à **POUR LA SCIENCE** pour la durée cochée :
(12 numéros par an dont un numéro spécial)

☐ 3 ans à 690 F au lieu 1 062 F* soit **UNE ÉCONOMIE DE 372 F.**
Je recevrai en cadeau le **Rubik's clock + une calculatrice solaire.**

☐ 2 ans à 495 F au lieu 708 F* soit **UNE ÉCONOMIE DE 213 F.**
Je recevrai en cadeau le **Rubik's clock.**

☐ 1 an à 290 F au lieu 354 F* soit **UNE ÉCONOMIE DE 64 F.**
Je recevrai en cadeau une **calculatrice solaire.**

* Prix de vente au numéro Tarifs en France

Autres pays : ☐ 3 ans : 850 F
☐ 2 ans : 620 F
☐ 1 an : 350 F

Pour une expédition par avion ajouter 120 F par année d'abonnement pour les départements français d'outremer, 200 F pour les autres pays.

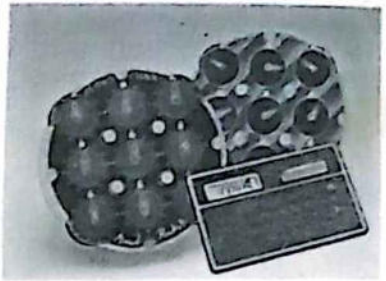
Ci-joint mon règlement par :
☐ chèque à l'ordre de POUR LA SCIENCE
☐ carte bleue n° |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|
Date d'expiration _____
Signature (obligatoire) :

M., Mme, Mlle, Nom _____
Prénom _____
Adresse complète _____
_____
Code Postal |_|_|_|_|_| Ville _____
Pays _____

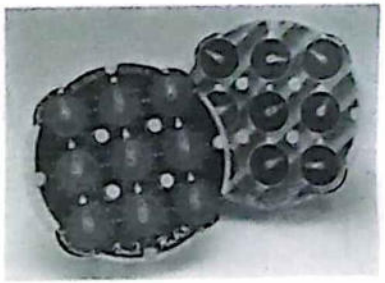
OFFRE RÉSERVÉE AUX NOUVEAUX ABONNÉS

OFFRE RÉSERVÉE AUX NOUVEAUX ABONNÉS

Pour un abonnement de 3 ans à POUR LA SCIENCE
Économisez 372 F et recevez le Rubik's clock + une calculatrice solaire



Pour un abonnement de 2 ans à POUR LA SCIENCE
Économisez 213 F et recevez le Rubik's clock



Pour un abonnement de 1 an à POUR LA SCIENCE
Économisez 64 F et recevez une calculatrice solaire

en renvoyant votre bulletin d'abonnement avec votre règlement, sous enveloppe affranchie à

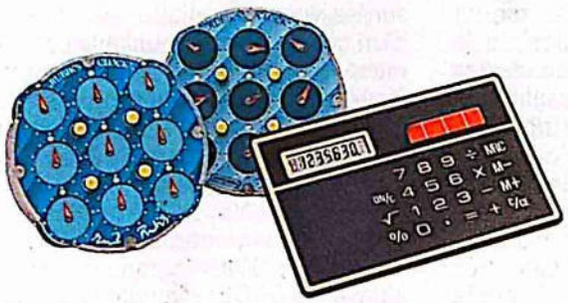
POUR LA
SCIENCE
8, rue Férou – 75006 PARIS

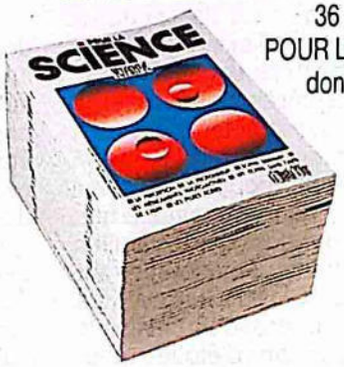
OFFRE RÉSERVÉE AUX NOUVEAUX ABONNÉS

RECEVEZ ET ÉCONOMISEZ

LE RUBIK'S CLOCK
+ UNE CALCULATRICE SOLAIRE

372 F



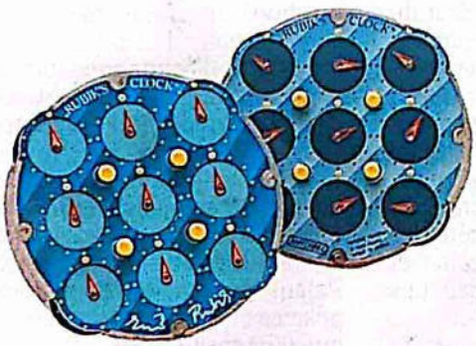


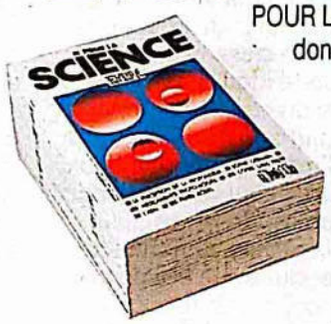
36 numéros de POUR LA SCIENCE dont 3 numéros spéciaux.

POUR UN ABONNEMENT DE 3 ANS.

LE RUBIK'S CLOCK

213 F



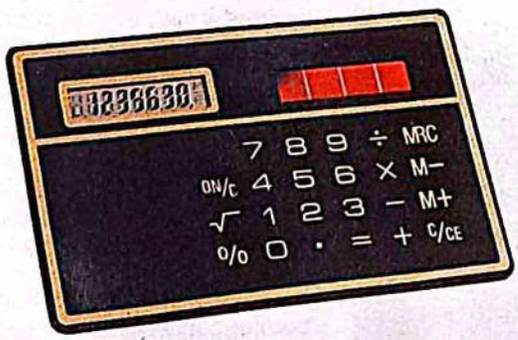


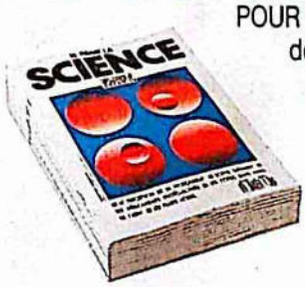
24 numéros de POUR LA SCIENCE dont 2 numéros spéciaux.

POUR UN ABONNEMENT DE 2 ANS.

UNE CALCULATRICE SOLAIRE

64 F





12 numéros de POUR LA SCIENCE dont 1 numéro spécial.

POUR UN ABONNEMENT D'1 AN.

Vous trouverez tous les détails de cette offre spéciale sur le bulletin d'abonnement ci-contre.

POUR LA SCIENCE... UNE SCIENCE D'AVANCE.

-95-

GREY DIRECT

100 ANS

Les étoiles doubles spectroscopiques

En 1890, Edward Pickering découvrit que les spectres d'émission de certaines étoiles présentaient des raies dédoublées : ces astres étaient des étoiles doubles.

Le terme d'étoile double fut, semble-t-il, employé pour la première fois par Ptolémée pour désigner les étoiles ν_1 et ν_2 Sagittarii qui sont en fait indépendantes. C'est Giambattista Riccioli qui aurait, en 1643, réalisé la première observation d'étoiles doubles, grâce à une lunette ; il découvrit que Mizar avait deux composantes. Dès 1761, Johann Heinrich Lambert eut l'intuition que de tels couples n'étaient pas fortuits, et John Mitchell, en 1767, et Christian Mayer, en 1779, émirent l'hypothèse du compagnon stellaire, sans pouvoir la vérifier. C'est William Herschel qui, en 1803, présenta les premières observations mettant en évidence le mouvement apparent d'une étoile du couple par rapport à l'autre. Il conclut que ce mouvement résultait de l'interaction de deux étoiles : c'était le début de la science des étoiles doubles.

En 1827, Félix Savary démontra que l'orbite relative du système d'étoile double Mizar était une ellipse décrite en 60 ans. Pour la première fois on vérifiait que les lois terrestres de la physique s'appliquaient au monde des étoiles. Jusqu'alors l'universalité de ces lois ne relevait que du domaine de la spéculation.

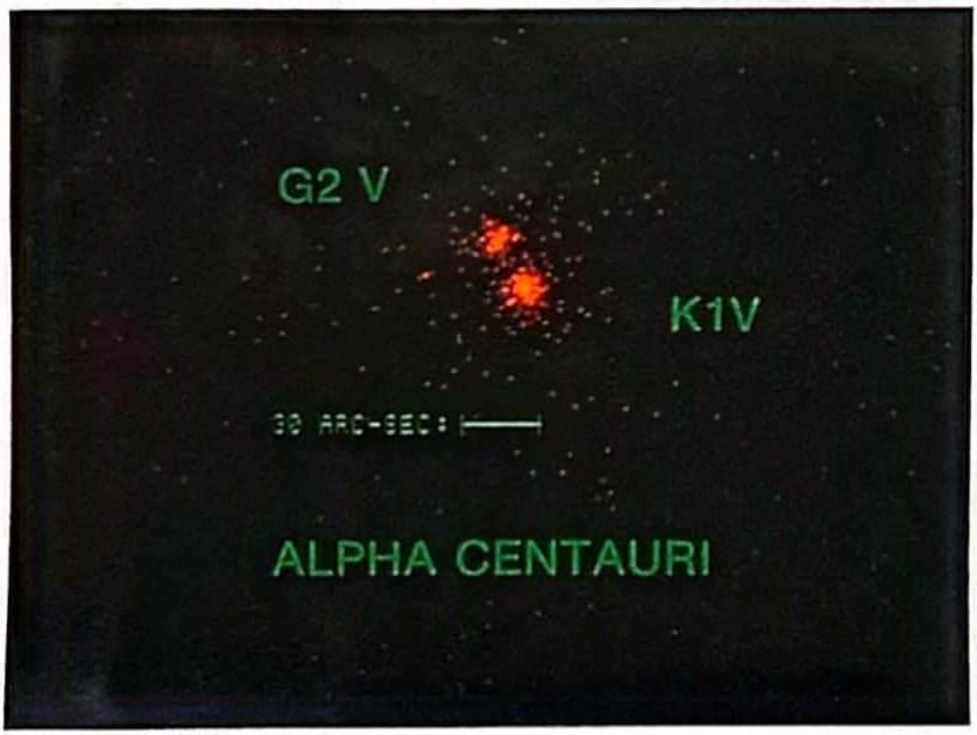
On sait aujourd'hui que deux étoiles peuvent paraître proches l'une de l'autre, parce que les directions sous lesquelles on les observe sont très voisines (les étoiles pouvant être très éloignées), ou parce qu'elles sont effectivement proches. Les étoiles correspondant au premier cas, les couples optiques, sont rares ; les secondes, les étoiles binaires ou doubles, sont physiquement liées : chaque étoile décrit une ellipse autour de l'autre, comme les planètes autour du Soleil. On estime que plus de la moitié des étoiles de notre Galaxie sont doubles (ou même multiples).

Après les travaux de Savary sur le cas particulier de Mizar, Herschel résolut le problème dans le cas général. Vers 1900 on avait décrit une centaine d'orbites dont les périodes s'échelonnaient entre une dizaine et quelques centaines d'années. Les étoiles doubles décelées par les télescopes ne sont pas les seuls systèmes binaires. Certains astrophysiciens ne se contentaient pas d'observer les étoiles, mais analysaient le rayonnement qu'elles émettaient. C'est ainsi qu'Edward Pickering découvrit un dédoublement périodique des raies de certains spectres stellaires : il y reconnut l'effet d'un mouvement orbital, sur les vitesses radiales des éléments d'un couple non dédoublable optiquement ; la position de ces raies variait légèrement au cours du temps par suite du mouvement orbital des deux entités.

Edward Pickering, descendant d'une des plus anciennes familles établies en Nouvelle-Angleterre, et dont l'arrière-grand-père était un des seconds de Washington, commença à travailler à l'Observatoire de Harvard en 1869. C'était un physicien, et sa nomination à l'Observatoire de Harvard témoigne de l'évolution que subit l'astronomie à la fin du XIX[e] siècle : l'étude des lois physiques régissant le mouvement des étoiles allait désormais compléter les relevés de leurs positions et de leurs mouvements. Les travaux de Pickering ont fait progresser l'astronomie dans le domaine de la photométrie visuelle, de la spectroscopie et de la photographie stellaire.

Il fit construire de nouveaux photomètres, notamment le photomètre méridien où l'image d'une étoile coupant le méridien est alignée avec celle de Polaris par un jeu de miroirs et de prismes ; Polaris, dont on pensait alors que l'intensité était constante, était l'étoile référence par rapport à laquelle il mesurait l'intensité des autres étoiles étudiées. En 25 ans il fit ainsi un million et demi de relevés photométriques. En 1886, il entreprit un programme qui comportait trois parties : réaliser les spectres de nombreuses étoiles et étudier précisément, d'une part ceux des étoiles les plus intenses et, d'autre part, ceux des étoiles les moins lumineuses. Il réalisait ses spectres en plaçant un prisme volumineux devant l'objectif de son télescope, et c'est ainsi qu'il découvrit que la composante la plus brillante de Mizar était une étoile binaire spectroscopique.

Les multiples observations du siècle dernier concernant les étoiles doubles n'auront pas été inutiles, car de nombreuses étoiles doubles visuelles n'ont pas encore décrit une révolution complète depuis leur découverte, c'est-à-dire qu'elles n'ont pas encore été observées une nouvelle fois dans la même position relative.



L'étoile double Alpha Centauri, observée dans le domaine des rayons X par le satellite *Einstein*.

50 ANS

Vers la bombe atomique

En 1938, Otto Hahn et Fritz Strassmann découvraient la fission du noyau d'uranium, et ouvraient la voie à la physique nucléaire. Les découvertes de nouveaux éléments ou de leurs isotopes se succédèrent et les cases vides de la Classification périodique des éléments se remplirent progressivement : en 1940, E. McMillan et P. Abelson identifiaient le premier élément transuranien, le neptunium.

Plusieurs équipes firent des expériences sur les nouveaux éléments instables découverts, et cherchèrent à obtenir des informations sur le mécanisme de la fission afin d'établir si une réaction en chaîne était une possibilité sérieuse. Il devint rapidement clair que l'on pouvait réaliser des explosifs nucléaires d'une puissance inégalée jusqu'alors. Avec le début de la guerre, plusieurs physiciens qui étudiaient le problème de l'énergie nucléaire, notamment Joliot, Szilard, Wigner, Weisskopf et Fermi, attirèrent l'attention des pouvoirs publics sur les potentialités de cette nouvelle arme. Einstein fut amené à écrire une lettre au président américain Roosevelt, où il expliquait la situation et ses implications ; Fermi prit contact avec les responsables de la marine américaine.

Simultanément Bohr concevait une théorie selon laquelle l'uranium 238 ne subissait la fission que lorsqu'il était bombardé par des neutrons d'énergie supérieure à un méga-électronvolt ; les neutrons lents déclenchaient uniquement la fission de l'isotope rare ^{235}U, présent dans l'uranium naturel en proportion d'une partie pour 137. On confirma bientôt cette hypothèse : de ces expériences, il ressortait que, pour réaliser une bombe à uranium, on devait d'abord séparer les isotopes de l'uranium, entreprise ardue.

À l'Université de Californie, McMillan et Abelson bombardèrent une feuille d'uranium, et ils isolèrent un isotope, dont la masse atomique était égale à 93 et qui émettait des neutrons ; ils le nommèrent neptunium. L'élément 94, le plutonium, résultait de la désintégration du neptunium, mais les faibles quantités mises en jeu dans les premières expériences ne permirent pas immédiatement sa détection. C'est l'équipe californienne de Seaborg qui prépara effectivement du plutonium, dont on pouvait obtenir la fission par des neutrons lents. On découvrit ultérieurement que le plutonium 239 existait dans les gisements naturels d'uranium et qu'il était encore plus fissile que l'uranium 235.

Les physiciens savaient obtenir la fission, par des neutrons lents, de l'uranium 235 très rare et de cet élément de numéro atomique 94 et de masse 239. Cet élément éviterait-il la séparation délicate des isotopes de l'uranium ? Pour prouver que la filière utilisant le plutonium était réalisable, il fallait en produire des quantités suffisantes afin d'en définir les propriétés nucléaires.

En 1941, Segré, Seaborg et leurs collègues préparèrent un microgramme de plutonium 239 dans le cyclotron de Berkeley, et ils démontrèrent que l'on pouvait l'utiliser comme combustible nucléaire. Deux voies s'ouvraient pour la construction de la bombe atomique : celle de la séparation des isotopes de l'uranium et celle de la préparation de plutonium en quantité suffisante. Dans le premier cas on devait construire de grands spectrographes de masse, et dans le second, un réacteur nucléaire où se formerait le plutonium qui devrait être ensuite séparé des autres composés, puis purifié. Une fois les explosifs disponibles, l'uranium 235 ou le plutonium 239, restait à construire la bombe.

Au tout début de la guerre, les recherches menées aux États-Unis reçurent peu de crédits de la part du gouvernement américain, qui était surtout préoccupé par les projets les plus urgents, comme le radar. Les possibilités de libérer facilement l'énergie nucléaire laissaient nombre de responsables sceptiques, et les explosifs nucléaires restaient trop incertains pour que l'on concentre, en temps de crise, les ressources matérielles et humaines nécessaires. Cependant cette attitude méfiante ne dura guère, et le programme américain prit son véritable essor à la suite de l'entrée en guerre des États-Unis en décembre 1941.

Il fut nécessaire de créer une technique nouvelle et de résoudre des problèmes que l'on n'avait jamais rencontrés à l'échelle industrielle. Les expériences commencèrent dans des laboratoires universitaires, puis on créa des laboratoires spécialisés. À mesure que le travail avançait, de grandes compagnies industrielles furent chargées du développement et de la mise en œuvre, dans le plus grand des secrets.

Malgré ces difficultés, quatre ans après la découverte de la fission, démarrait le premier réacteur nucléaire, et quatre années s'écoulèrent entre la découverte du plutonium et la réalisation de la première bombe atomique.

Dans sa demeure de Princeton, Einstein, en présence d'officiers américains.

Les oiseaux de Paradis

BRUCE BEEHLER

Les comportements sociaux et sexuels de ces oiseaux tropicaux dépendent notamment de leur régime alimentaire : en raison de leur alimentation particulière, certaines espèces sont monogames, tandis que d'autres s'accouplent très librement.

Charles Darwin est l'un des nombreux naturalistes que les paradisiers, ou oiseaux de Paradis, ont fascinés. Dans son livre *La descendance de l'Homme et la sélection naturelle*, publié en 1871, il écrivait : « Quand on voit un mâle qui parade devant une femelle et lui présente ses immenses plumes aux couleurs superbes, on suppose nécessairement que la femelle admire la beauté de son partenaire. »

Cette remarque est plus que centenaire, mais les biologistes étudient encore l'évolution des plumes nuptiales et les comportements de reproduction des paradisiers mâles. Dans les dix dernières années, des chercheurs d'une nouvelle génération, formés à l'éthologie et à l'écologie, ont beaucoup appris sur l'organisation sociale des paradisiers.

Avec Thane Pratt, du Service américain des pêches et de l'environnement à Hawaii, Clifford et Dawn Frith, de la Fondation internationale de conservation de l'environnement, Stephen et Melinda Pruett-Jones, de l'Université de Chicago, j'ai passé plus de dix ans à étudier ces oiseaux dans leur milieu naturel. Après ces milliers d'heures d'observation, nous avons conclu que la diversité des comportements sociaux et sexuels manifestée par cette spectaculaire famille d'oiseaux résulte de facteurs écologiques. Nous avons également découvert que la préservation et la régénération des forêts vierges de la Nouvelle-Guinée reposent en grande partie sur les oiseaux frugivores.

J'ai commencé l'étude des paradisiers en 1975, lors d'un séjour de 15 mois dans la forêt de Nouvelle-Guinée. Quoique 14 ans se soient écoulés depuis, je me rappelle encore mon émerveillement lorsque j'ai posé le pied sur l'île : nous nous étions à peine enfoncés dans la forêt tropicale, à l'Est de l'île, que je me suis trouvé devant un grand arbre où perchaient huit *Paradisaea raggiana* mâles. Qu'ils étaient beaux, avec leur tête jaune, leur cou vert vif et leur poitrine d'un brun velouté ! Ils faisaient frémir leurs longues plumes rouges en paradant devant une femelle qui était venue se placer au centre du groupe, à moins de 15 centimètres du plus proche galant. Les mouvements de ces oiseaux, leurs couleurs et leurs chants nuptiaux furent et resteront parmi les plus beaux spectacles naturels que j'ai contemplés.

Les mystères des paradisiers

La famille des Paradiséidés – les paradisiers, ou oiseaux de Paradis, et les oiseaux jardiniers – compte 42 espèces ; 36 d'entre elles ne se trouvent qu'en Nouvelle-Guinée et sur les îles voisines, 4 se sont installées en Australie orientale et 2 se sont aventurées vers l'Ouest, jusqu'au Nord des Moluques, en Indonésie. La famille regroupe des oiseaux apparemment très différents, comme les Épimaques, les Paroties, les Astrapies à longue queue, les Paradisiers à plumage épais et les Manucodes noirs, mais tous sont râblés, dotés de pattes puissantes ; les différences essentielles portent sur la couleur et la forme des plumes. Dans la plupart des espèces, le dimorphisme sexuel est notable : les mâles ont des couleurs vives et portent de somptueuses plumes, appelées plumes nuptiales ; les femelles, plus ternes, n'ont pas ces plumes ornementales.

Les coloris vifs et les comportements de séduction des paradisiers mâles attestent l'importance de la sélection sexuelle, le phénomène par lequel certains individus gagnent (et d'autres perdent) le droit de se reproduire. La rivalité entre les individus d'un même sexe (généralement les mâles) pour s'accoupler avec les membres de l'autre sexe explique pourquoi les mâles et les femelles diffèrent souvent : le coq est plus grand que la poule, le cerf porte des bois que la biche n'a pas, par exemple.

L'étude moderne de la sélection sexuelle porte sur la nature des interactions entre les mâles, et pas seulement sur les interactions des mâles et des femelles. Pourquoi le dimorphisme sexuel est-il considérable chez certaines espèces de paradisiers et quasi inexistant chez d'autres ? Les plumes ornementales dénotent-elles une hiérarchie sexuelle ou signalent-elles aux femelles que leurs possesseurs sont sains et vigoureux ? Si la deuxième hypothèse est la bonne, les femelles sélectionnent-elles effectivement leurs partenaires à partir de ces critères physiques ? On étudie encore ces questions, mais nous avons récemment découvert le rôle crucial des facteurs écologiques sur le comportement des paradisiers.

L'organisation sociale

Le dimorphisme sexuel n'existe pas chez toutes les espèces : dans 9 des 42 espèces que compte la famille, les mâles et les femelles ont la même apparence. Les espèces sans dimorphisme, comme *Manucodia keraudrenii*, sont également monogames : les mâles et les femelles forment des couples stables durant toute la vie des

1. PARADISIER DE RAGGI MÂLE paradant devant une femelle *(qui n'apparaît pas)*. La tête en bas, il a déployé ses ailes et exhibe ses flancs orange. Les mâles paradent quotidiennement pendant six mois par an.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

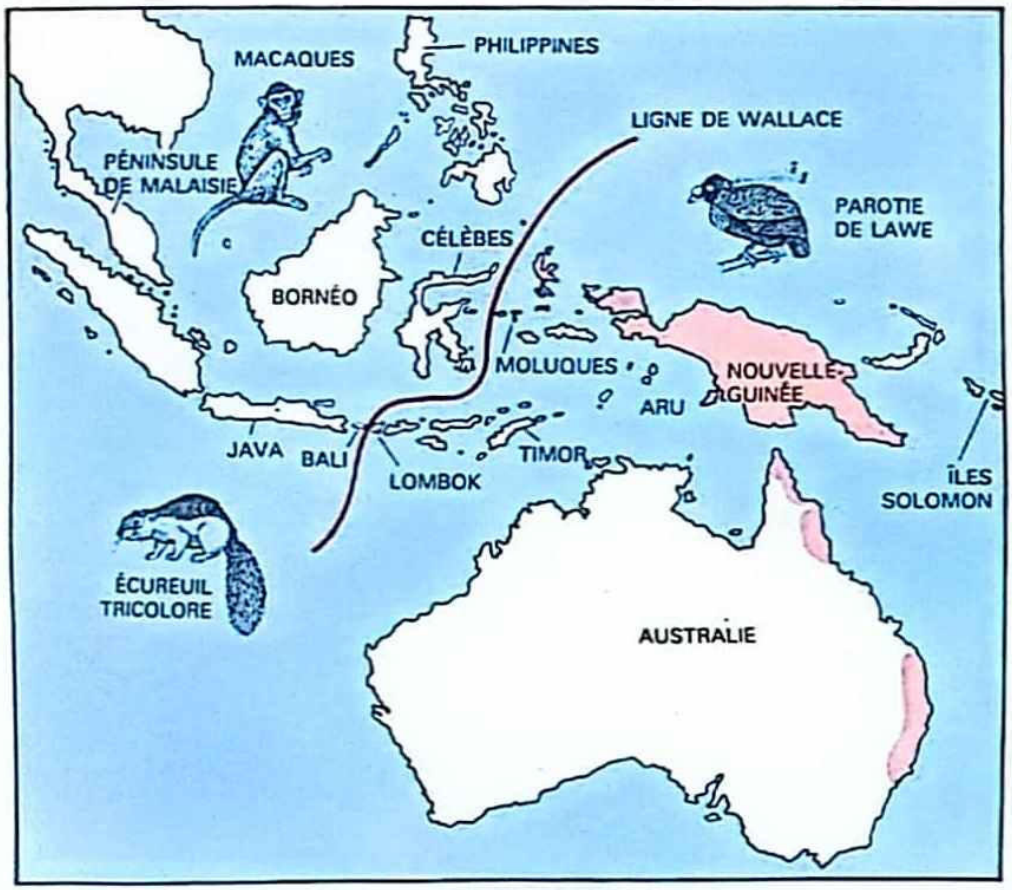
partenaires ; les deux partenaires élèvent ensemble leurs petits. Au contraire, les espèces dimorphes, comme *Paradisaea raggiana*, sont polygames : chaque mâle féconde autant de femelles qu'il peut et ne participe pas à l'élevage des jeunes.

Comment des comportements aussi différents sont-ils apparus au sein d'une même famille ? Pourquoi certaines espèces sont-elles polygames et d'autres monogames ? La réponse comporte deux parties. D'une part, la polygamie résulte de l'anisogamie, c'est-à-dire de différences des cellules sexuelles mâles et femelles ; d'autre part, les comportements de recherche de nourriture et les conséquences du régime alimentaire déterminent le comportement de reproduction.

Les spermatozoïdes sont beaucoup plus petits que les ovules, et leur production est énergétiquement moins coûteuse. Chez beaucoup d'espèces, les mâles maximisent leur succès reproducteur (le nombre de gènes qu'ils transmettent à la génération suivante) en s'accouplant avec le plus de femelles possible. Celles-ci, en revanche, ne produisent que quelques ovules, et leurs possibilités reproductrices sont généralement limitées. Cette différence engendre des différences de comportement et de morphologie entre les sexes : les mâles ont tendance à être « volages » et à se disputer (parfois âprement) les femelles ; ces dernières ont tendance à être sélectives et à préférer les mâles qui présentent certains caractères.

On comprend alors que, dans les populations monogames, les rivalités sont moindres, tout comme le dimorphisme sexuel. Dans les populations polygames, où la compétition sexuelle est rude, le dimorphisme s'accroît parce que les mâles dont les plumes et les comportements de parade nuptiales sont les plus spectaculaires fécondent plus de femelles et, ainsi, transmettent davantage leurs gènes. Un chant un peu plus fort, une attitude plus agressive, un plumage plus chatoyant favorisent le mâle qui les possède : ces caractères sont transmis à la descendance et s'accentuent de génération en génération.

Chez les espèces monogames comme chez les espèces polygames, les femelles sont généralement ternes : sollicitées par les mâles dans les deux cas, elles n'ont pas besoin de parures éclatantes. Comme les couleurs voyantes ne leur confèrent aucun avantage reproducteur, la sélection naturelle favorise les femelles ternes : une femelle aux teintes sombres échappe mieux aux prédateurs, et sa descendance a plus de chances de survivre.



2. LES PARADISIERS vivent dans les jungles d'Australie, de Nouvelle-Guinée et des Moluques. Ils occupent une niche écologique colonisée ailleurs par les mammifères arboricoles frugivores. L'absence de mammifères est probablement due à la fosse océanique qui sépare les archipels de l'Asie du Sud-Ouest de l'Australie et de la Nouvelle-Guinée ; la séparation est la « ligne de Wallace », du nom d'Alfred Russel Wallace, qui la repéra pour la première fois en 1863 et en précisa le tracé en 1910. Les paradisiers vivent à l'Est de cette ligne ; à l'Ouest, des mammifères placentaires comme les écureuils et les macaques mangent les fruits et les baies.

La lutte dans les bandes

Les Paradisiers de Raggi comme ceux que je vis en 1975 sont typiques des espèces polygames et sexuellement dimorphes. Leur parade nuptiale est complexe, et comme plusieurs mâles la pratiquent simultanément, elle est également l'occasion de luttes. Les mâles en quête de femelle se rassemblent chaque matin, à l'aube, dans les arbres à parade. Ils signalent leur présence aux femelles des environs en criant bruyamment : *wau, wau, wau, Wau, Wau, Wau,* WAU, WAU, WAU, WAU, de plus en plus fort et de plus en plus vite. Quand une femelle les rejoint dans l'arbre, les mâles se mettent à danser, ils soulèvent leurs plumes nuptiales, battent des ailes et sautillent de gauche à droite, tout en continuant de crier.

Après quelques instants de ce bruyant manège, les mâles se taisent et se laissent pendre de leur perchoir, la tête en bas, leurs ailes tendues en avant et leurs plumes orange dressées, à la manière d'une resplendissante fontaine de couleurs. Tout le groupe reste dans cette position jusqu'à ce que la femelle, après s'être promenée silencieusement de mâle en mâle, en choisisse un et s'accroupisse auprès de lui. Passivement les autres mâles regardent l'élu exécuter une danse de pré-copulation, puis couvrir la femelle. Celle-ci se dégage bientôt et s'envole vers son nid, où elle pondra un œuf, un ou deux jours plus tard.

Les mâles des autres espèces polygames se comportent de manière analogue, mais chaque espèce a son propre rituel amoureux, souligné par les coloris et les plumes typiques du mâle. Chez l'Épimaque *Epimachus albertisi*, par exemple, le mâle se suspend la tête en bas et, de ses plumes gonflées, se drape dans une sorte de cape circulaire ; chez le Paradisier magnifique *Cicinnurus magnificus*, le mâle déploie un jabot de plumes et danse comme un jouet mécanique, la queue dressée, en se tenant à une tige verticale. Chez la Parotie de Lawe, *Parotia lawesii*, le mâle parade au sol, tandis que la femelle l'observe du haut d'une branche : tout en sautillant, il

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

3861

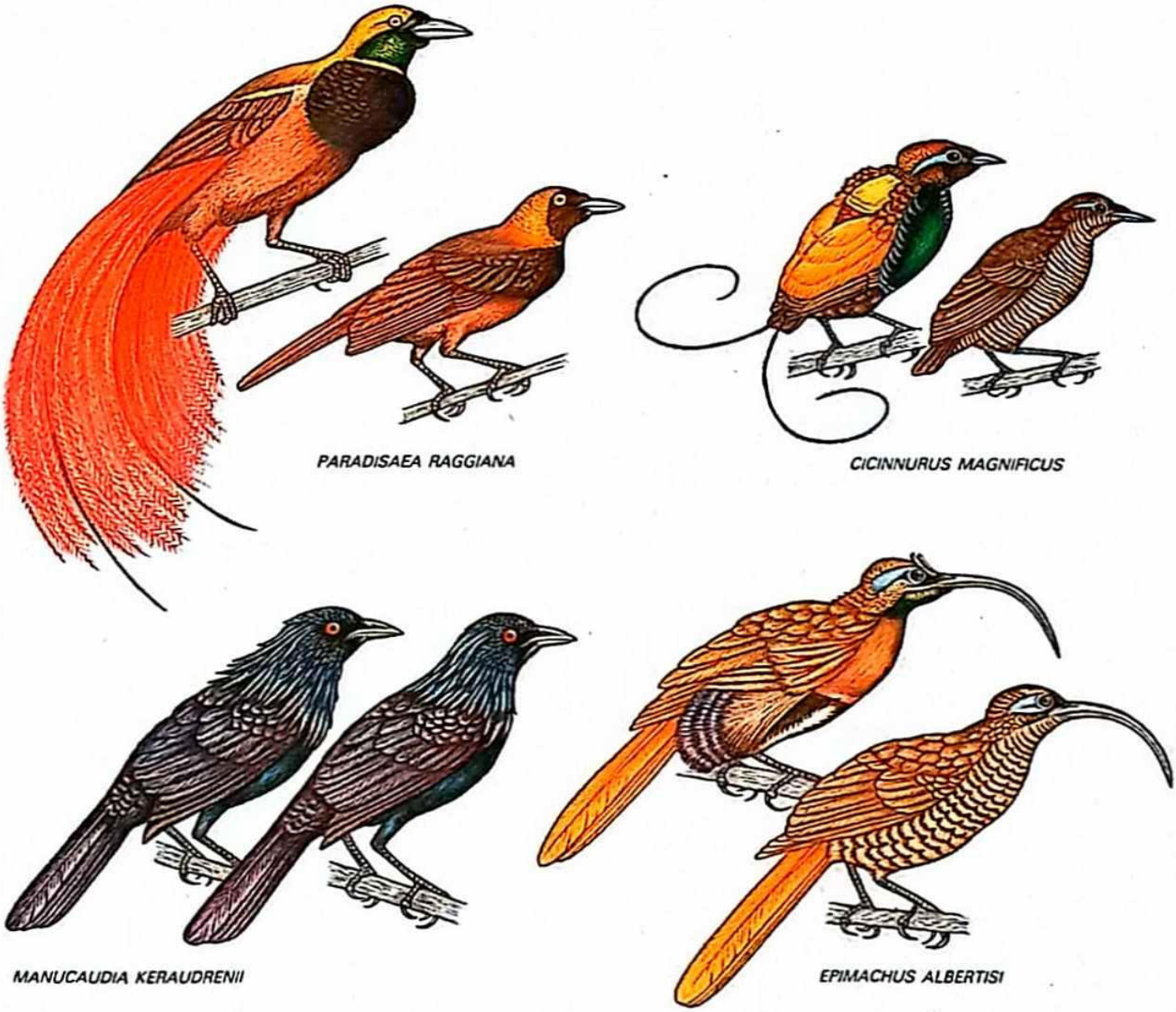
tend vers l'avant les six longues plumes de sa huppe, raides comme des antennes, et déploie ses rémiges autour de lui, comme une jupe.

Chez certaines espèces polygames, tels les Paradisiers de Raggi, les mâles se rassemblent en bandes et exécutent ensemble leur parade. Les bandes varient selon les espèces : les Paradisiers de Raggi, par exemple, se regroupent à plusieurs sur un même arbre, alors que les Paroties de Lawe forment des bandes « éclatées » : ils s'éparpillent, laissant une dizaine, voire plus d'une centaine de mètres entre eux ; tous pourtant restent membres de la même bande et paradent ensemble. Chez d'autres espèces encore, comme le Paradisier magnifique, les mâles ne forment pas de bandes et paradent individuellement.

Pourquoi les mâles ne forment-ils des bandes que dans certaines espèces seulement ? Dans la plupart des bandes, un ou deux mâles dominants (qui se tiennent généralement vers le centre du groupe) ont généralement plus de succès que les autres ; les mâles périphériques sont rarement sélectionnés par les femelles. J'ai ainsi observé que dans une bande de *Paradisidaea minor*, 25 des 26 accouplements effectués au cours d'un mois avaient été réalisés par un seul mâle. Pourquoi les mâles se rassemblent-ils ? Les chances, pour la plupart, ne seraient-elles pas meilleurs hors des bandes ? Pourquoi certaines espèces forment-elles des bandes et d'autres pas ? Ces trois questions ont la même réponse : la formation des bandes et la polygamie résultent de l'alimentation des espèces.

Alimentation et comportement

Les relations entre la polygamie et le régime alimentaire sont apparues pour la première fois vers 1970, à l'occasion d'une étude de David et Barbara Snow, du Muséum britanni-



3. LE DIMORPHISME SEXUEL, c'est-à-dire la différence d'aspect entre les mâles et les femelles, est variable selon les espèces de paradisiers. Il est très prononcé chez le Paradisier de Raggi, *Paradisaea raggiana (en haut à gauche)* : les mâles sont plus grands que les femelles et possèdent des plumes rouge vif qu'ils exhibent quand ils paradent ; les femelles sont de couleur terne, comme chez tous les paradisiers. Chez le Paradisier magnifique, *Cicinnurus magnificus (en haut à droite)*, les mâles et les femelles sont approximativement de la même taille, mais les mâles sont très colorés et portent deux plumes caudales qu'ils agitent pour séduire les femelles. Chez l'Épimaque *Epimachus albertisi (en bas à droite)*, les mâles et les femelles ont un long bec recourbé avec lequel ils extraient les insectes xylophages de leurs galeries et les fruits capsulaires de leur coque très dure. Chez le Manucode *Manucodia keraudrenii (en bas à gauche)*, les mâles et les femelles sont quasi identiques.

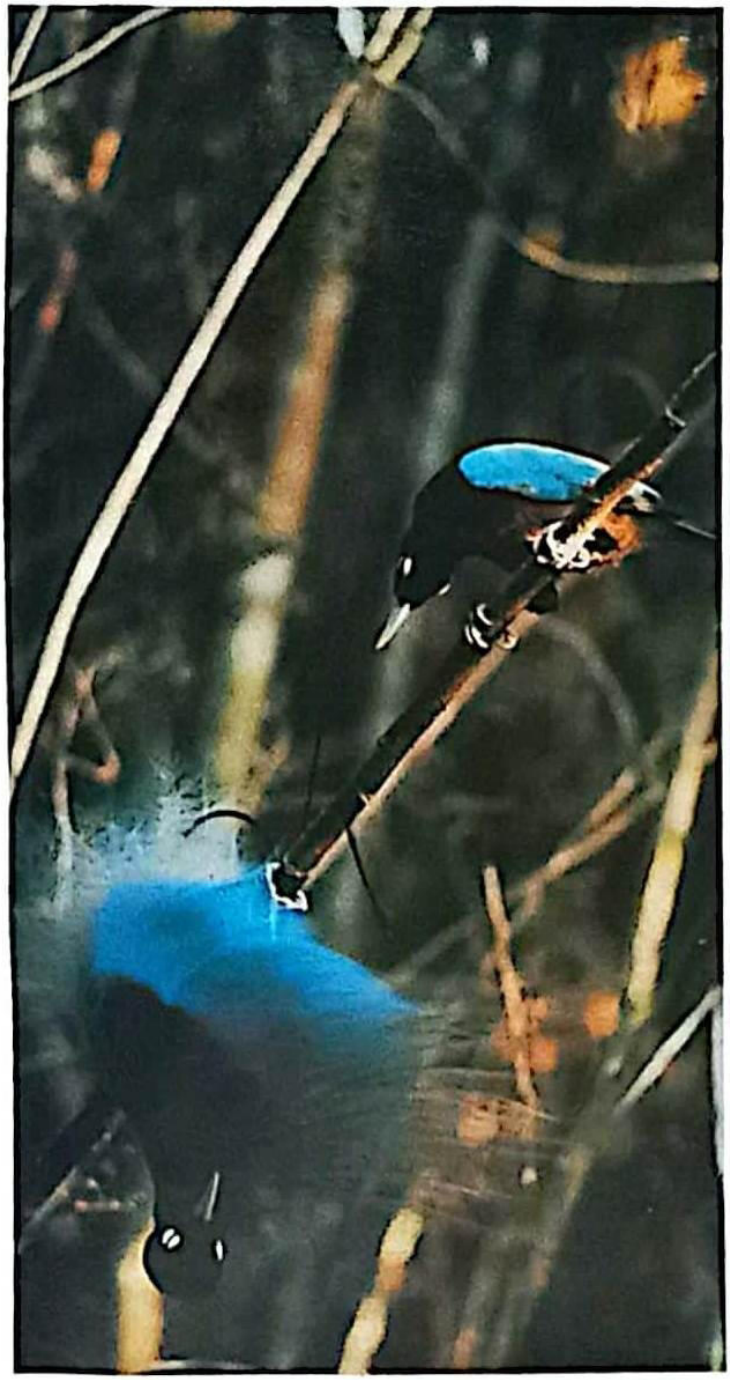
que d'histoire naturelle : ce travail était consacré aux rapports entre l'organisation de la reproduction et la spécialisation alimentaire chez deux familles d'oiseaux, les Cotingidés et les Pipridés, qui vivent dans les jungles d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud. Ces deux familles ne sont pas très proches de celle des Paradiséidés, mais le dimorphisme sexuel et le comportement reproducteur sont étonnamment analogues.

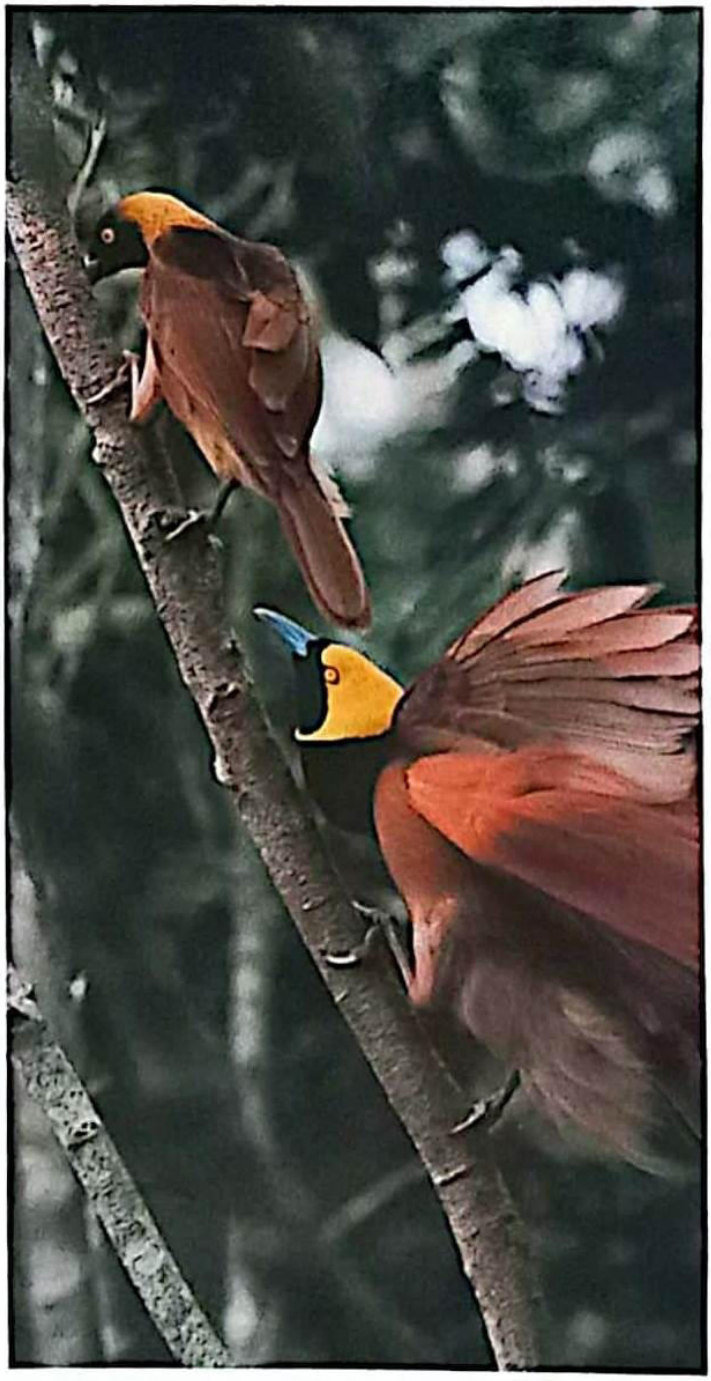
D. et B. Snow observèrent que la plupart des espèces polygames étaient frugivores, tandis que les espèces monogames étaient exclusivement, ou presque exclusivement, insectivores. Ils découvrirent aussi que la consommation d'insectes nécessite plus de temps et d'énergie que la consommation de fruits ; seul un régime à base de fruits laissait aux mâles polygames le temps de se livrer à leurs absorbantes stratégies amoureuses. En allait-il de même pour les paradisiers ?

Il s'est avéré que la relation entre le régime alimentaire et le comportement sexuel est bien plus complexe chez les Paradiséidés que chez les Cotingidés et les Pipridés : la situation est même inversée ! Les recherches que nous avons effectuées en Nouvelle-Guinée montrent que les spécialisations alimentaires des paradisiers semblent avoir déterminé l'évolution des espèces : elle a favorisé la diversification et suscité l'apparition des comportements polygames.

Les fruits dont se nourrissent les paradisiers sont deux types : les fruits simples, comme les figues banian, abondent en forêt et sont riches en eau et en glucides ; les fruits complexes, comme les noix muscades, sont assez gros, généralement protégés par une coque dure et produits en quantité relativement faible. Ces fruits capsulaires sont souvent riches en graisses ou en protéines et constituent de ce fait des denrées précieuses pour les oiseaux.

Avec T. Pratt, nous avons remarqué que tous les paradisiers, comme la plupart des autres oiseaux de la jungle,





4. LES COMPORTEMENTS SEXUELS des paradisiers varient selon les espèces et sont souvent complexes. Deux de ces comportements apparaissent ici. Suspendu à l'envers, un paradisier mâle bleu bat des ailes, tandis qu'une femelle l'observe attentivement *(à gauche)*. Le Paradisier de Raggi mâle qui a séduit une femelle *(à droite)* va s'accoupler avec elle.

se gorgent de figues quand elles mûrissent. Or le figuier banian produit, à intervalles irréguliers et imprévisibles, des milliers de petites figues qui mûrissent rapidement ; les oiseaux disposent de ces fruits toute l'année. Dès qu'un arbre fructifie, les manucodes, les colombes porphyres, les perroquets des figuiers, les petothuis, les méliphages et les paradisiers accourent en foule pour se gaver de ses fruits.

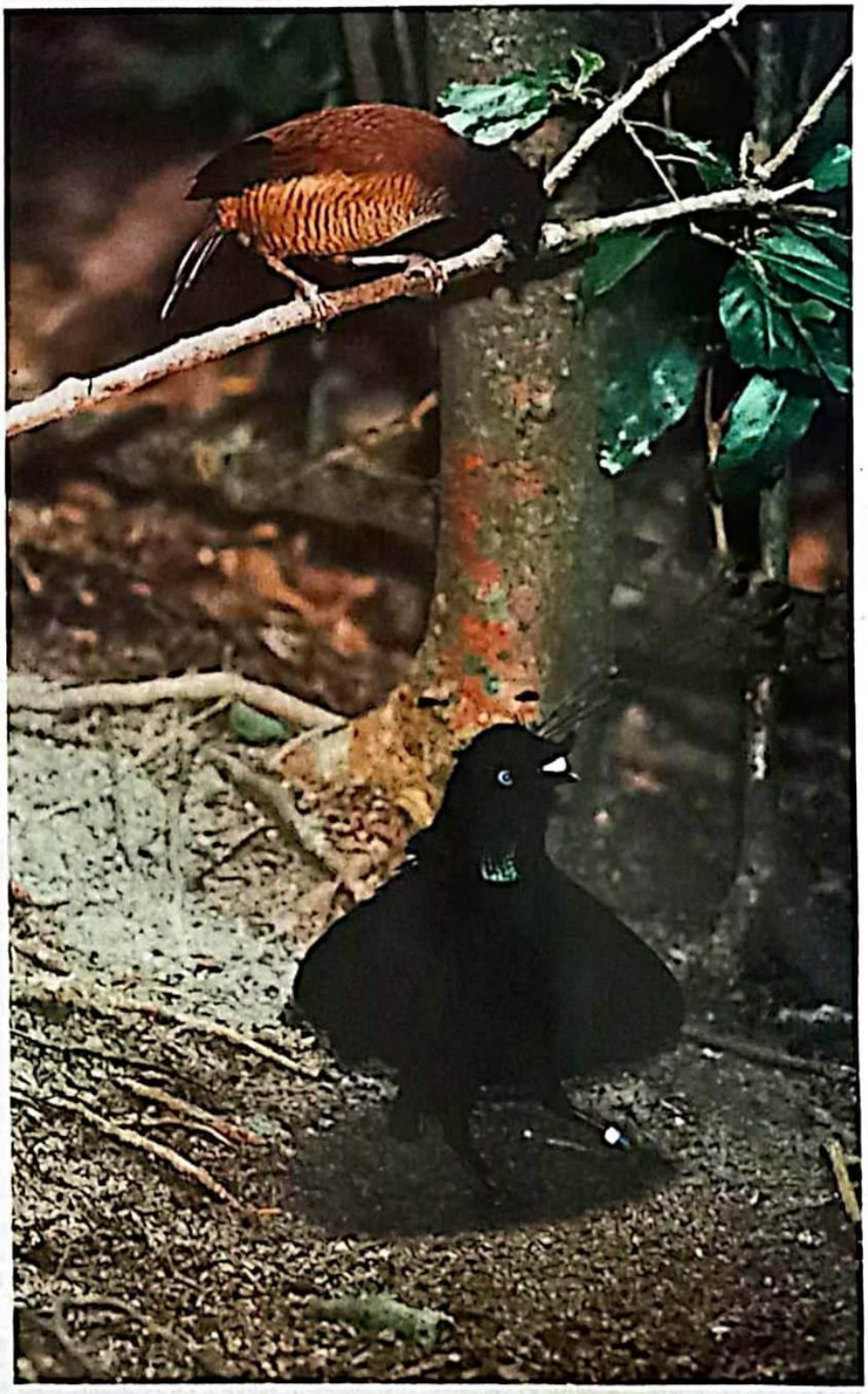
Seul le paradisier *Manucodia keraudrenii*, qui est monogame, se nourrit presque exclusivement de figues. La plupart des autres paradisiers s'en régalent, quand l'occasion se présente, mais la majorité des espèces polygames recherchent surtout des fruits complexes, généralement de type capsulaire ; ces fruits parviennent à maturité par petites quantités à la fois, au cours d'une longue saison de fructification, et les oiseaux reviennent, jour après jour, consommer les fruits qui sont à point. Les fruits capsulaires sont plus difficiles à consommer que les figues, parce qu'ils sont enfermés dans une coque ligneuse, coriace, et se composent d'une seule graine enrobée dans la partie comestible ; l'oiseau doit avaler le fruit tout entier et rejeter la coque.

Nous avons observé que certaines espèces capables de consommer des fruits capsulaires parcimonieusement produits et difficiles à ouvrir sont également celles qui se nourrissent d'insectes. Les oiseaux insectivores parcourent les branches et les troncs en les sondant et en les attaquant du bec, à la manière des pics, pour y repérer et en extraire les insectes ou larves xylophages qui s'y trouvent ; ils consomment aussi les insectes qui se cachent dans des feuilles enroulées : ils déroulent ces « cigares » avec leurs pattes et saisissent l'insecte dans leur bec. Or les adaptations anatomiques qui leur permettent de capturer et de manger des insectes (long bec, pattes puissantes) leur permettent aussi de manger des fruits capsulaires.

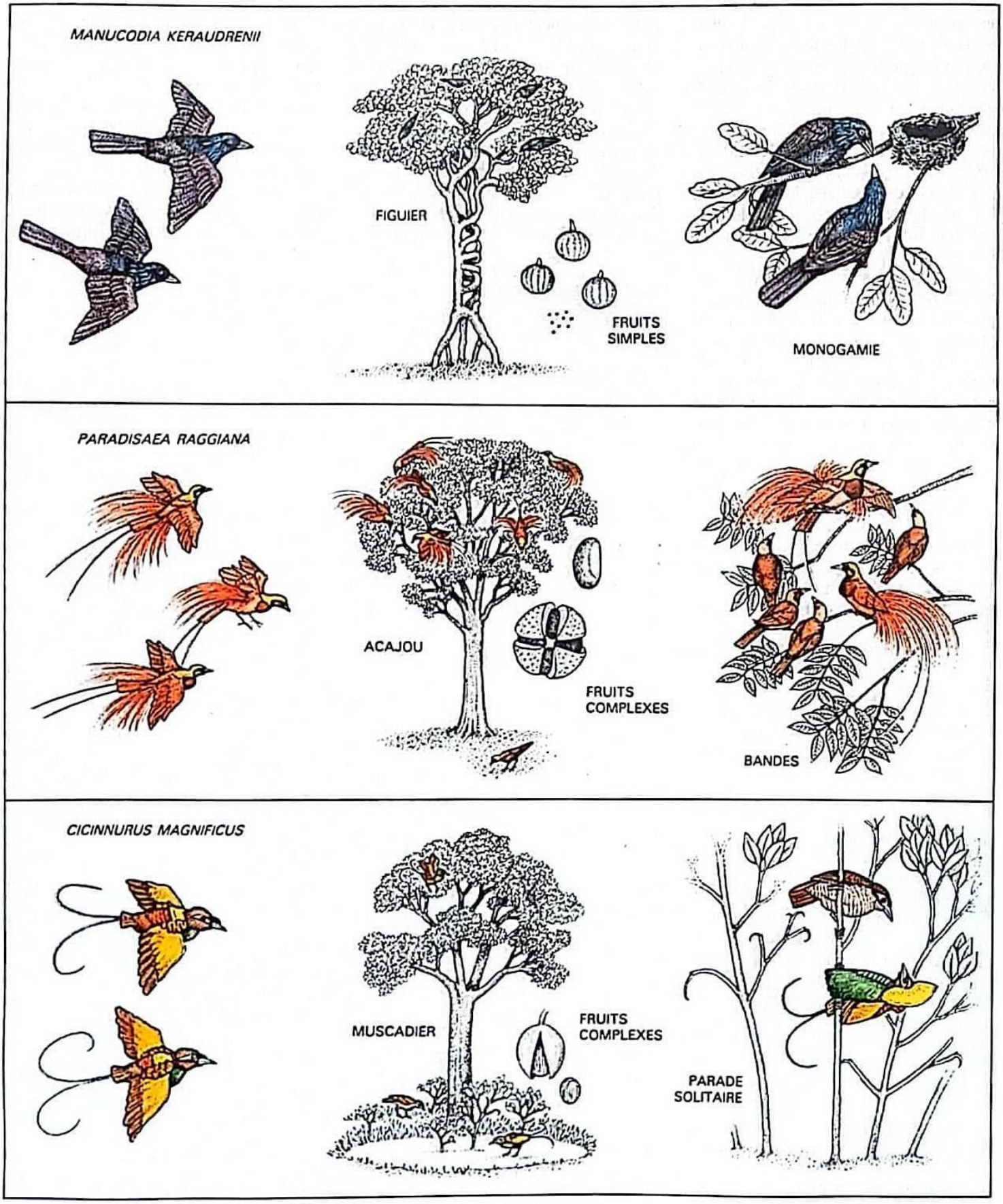
Les oiseaux qui se nourrissent de figues cherchent rarement leur pitance dans des arbres à fruits capsulaires. En revanche, de nombreux arbres de ce type ne sont visités que par des paradisiers polygames. Pourquoi ? En partie du fait d'un hasard biogéographique.

Les singes et les écureuils (et la plupart des mammifères placentaires) n'ont pas colonisé les terres situées au-delà de la ligne de Wallace, la grande fosse océanique qui sépare l'Australie et la Nouvelle-Guinée des îles de l'Asie du Sud-Est. Dans les habitats tropicaux situés à l'Ouest de cette ligne, les écureuils et les singes consomment quasiment tous les fruits, même les variétés capsulaires les mieux protégées. Dans bien des cas, les végétaux ne tirent aucun avantage de cette situation : contrairement aux paradisiers qui disséminent les graines, les mammifères mangent et détruisent souvent ces dernières. En Nouvelle-Guinée, les mammifères amateurs de fruits complexes sont rares, si bien que ces aliments intéressants sont à la disposition quasi exclusive des paradisiers.

De surcroît, T. Pratt et moi avons montré que les paradisiers polygames comptent parmi les meilleurs disséminateurs botaniques de la jungle : ils mangent peu de fruits à la fois et n'en digèrent que les parties nutritives, laissant la graine intacte. Volant d'un



5. DU HAUT D'UNE BRANCHE, une femelle de l'espèce *Parotia lawesii* observe un mâle qui parade par terre. Le mâle a gonflé ses plumes et, après sa danse, il rejoindra la femelle et tentera de la féconder. Les paroties mâles forment des bandes « éclatées » : ils paradent ensemble, mais à une certaine distance les uns des autres.



6. L'ORGANISATION SOCIALE des paradisiers, comme les comportements sexuels, est liée aux mœurs alimentaires de chaque espèce. Les Manucodes, *Manucodia keraudrenii (en haut)*, sont monomorphes et monogames : les mâles et les femelles se ressemblent, forment des couples stables, et chaque couple élève ses petits. Les oiseaux de cette espèce se nourrissent principalement de figues et nourrissent leurs jeunes de pulpe de figue. Les Paradisiers de Raggi, *Paradisaea raggiana (au milieu)*, sont dimorphes et polygames. Les mâles, physiquement différents des femelles, en courtisent autant que possible et s'accouplent avec toutes celles qui sont consentantes ; ces oiseaux ne forment pas de couple, et les femelles élèvent leur progéniture toutes seules. Les Paradisiers de Raggi se nourrissent principalement de fruits complexes, tels ceux de l'acajou ; les mâles se réunissent en bandes afin d'effectuer leur parade, espérant ainsi attirer les femelles qui parcourent la forêt à la recherche de nourriture. Comme le Paradisier de Raggi, le Paradisier magnifique *Cicinnurus magnificus (en bas)* est dimorphe et polygame ; comme le Paradisier de Raggi, il se nourrit de fruits complexes tels ceux du muscadier. En revanche, les Paradisiers magnifiques mâles sont individualistes : chacun établit, au milieu d'un bosquet, une aire circulaire dont il retire les feuilles et où il se tient pour chanter ; quand une femelle vient l'écouter, il monte sur une tige et se met à parader pour elle.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

arbre à l'autre afin de se restaurer, ils dispersent des semences à travers la forêt au lieu de les entasser, comme le font tant d'autres frugivores. Grâce à la capsule coriace qui couvre leurs graines, les plantes à fruits complexes sont assurées que des animaux appâtés par les fruits disperseront efficacement ces graines et assureront une bonne reproduction.

Polygames et gourmets

Comparons maintenant la stratégie alimentaire du *Manucodia keraudrenii*, monogame, et du *Cicinnurus magnificus*, polygame. Le Manucode est un spécialiste : n'étant pas très friand d'insectes, il se nourrit principalement de figues. Ce régime a des avantages et des inconvénients : les figues sont très abondantes, faciles à manger et à digérer, mais la fructification imprévisible des figuiers impose une surveillance permanente des arbres ; en outre, les figues sont pauvres en protéines, nécessaires à la croissance. De ce fait, le mâle doit aider la femelle à nourrir la couvée ; il est monogame par nécessité.

Le Paradisier magnifique *Cicinnurus magnificus* s'est également spécialisé : il se nourrit principalement de fruits complexes ; cependant il complète son alimentation par des insectes, et cet apport supplémentaire retentit sur son comportement social. Ce régime mixte de fruits complexes et d'insectes est avantageux, car l'oiseau sait où et quand les trouver ; de surcroît, les fruits complexes et les insectes sont suffisamment énergétiques pour que les femelles nourrissent leur progéniture sans aide. Les mâles sont ainsi libres de passer le plus clair de leurs journées sur les sites nuptiaux, qu'ils ne quittent que pour se nourrir.

Les études des paradisiers démontrent ainsi que le passage de la monogamie à la polygamie s'est produit chez les espèces qui se nourrissent de fruits complexes, accompagnés par des insectes et des fruits simples. Les espèces qui se nourrissent presque exclusivement de figues, comme *Manucodia keraudrenii*, sont restées monogames, probablement parce que la présence des deux parents est nécessaire auprès du nid.

Pourquoi les mâles de certaines espèces forment-ils des bandes ? Pourquoi les Paradisiers de Raggi, par exemple, exécutent-ils leur parade nuptiale en groupes serrés, alors que les Épimaques et les Paradisiers magnifiques œuvrent en solitaires ? Selon Jack Bradbury, de l'Université de San Diego, la formation des bandes dépend de la disponibilité des femelles, qui dépend elle-même des stratégies alimentaires, et donc du type d'alimentation. Les bandes se formeraient quand les femelles sont obligées d'explorer des territoires très vastes afin de trouver leur nourriture : des mâles en bandes auraient alors plus de chances d'attirer des femelles au cours de leurs explorations.

7. LES MÂLES de l'espèce *Parotia lawesii* diffèrent beaucoup des femelles. Les coloris éclatants de leur poitrine et les longues et fines plumes érectiles qu'ils portent à l'arrière de la tête sont des caractères sexuels secondaires qui, chez les Paroties et autres Paradisiers dimorphes, se sont peut-être développés en raison de la rivalité des mâles en présence des femelles.

Cette hypothèse s'accorde avec nos observations. Les femelles d'espèces bien connues, comme les Paradisiers de Raggi et les Paroties de Lawe, ont de vastes territoires qui se recouvrent partiellement : chaque site de rassemblement des mâles reçoit la visite de nombreuses femelles et favorise la polygamie. Chez d'autres espèces, comme le Paradisier magnifique ou les Épimaques, les femelles cherchent leur nourriture sur des territoires beaucoup plus petits et distincts, les probabilités de rencontres sont moindres, et la polygamie est défavorisée.

Nous concluons que trois facteurs favorisent la polygamie et la formation de bandes. Le regroupement des fruits permet aux mâles, groupés sur un site nuptial, de rencontrer de nombreuses femelles. En outre, la consommation de fruits complexes, énergétiquement riches et de fructification prévisible, permet aux femelles d'élever leurs jeunes sans aide, laissant aux mâles le temps de courir le guilledou. Enfin, plus les femelles ont un régime à base de fruits, plus elles doivent se déplacer pour en trouver : les mâles ont intérêt à se regrouper pour rencontrer des femelles. Ainsi les Paradisiers de Raggi et les Paroties, qui se nourrissent presque exclusivement de fruits complexes (rarement d'insectes), forment des bandes, alors que les Paradisiers magnifiques et les Épimaques, insectivores, n'en forment pas.

L'étude des facteurs écologiques dans l'évolution du comportement reproducteur des paradisiers a révélé le rôle du régime alimentaire dans l'organisation sociale. Les oiseaux et les plantes dont ils se nourrissent sont interdépendants. Les ornithologues savent désormais qu'ils doivent déterminer les relations des oiseaux avec leur habitat forestier s'ils veulent comprendre les diverses stratégies reproductrices de cette remarquable famille.

Bien des questions subsistent. Nos observations sur les rapports entre le régime alimentaire et le comportement sexuel s'appliquent-elles aux paradisiers qui n'ont pas encore été étudiés ? Pourquoi une femelle choisit-elle un mâle précis dans une bande ? Pourquoi certaines espèces forment-elles des bandes denses et d'autres des bandes éclatées ? Pourquoi enfin les mâles s'obstinent-ils à se grouper en bandes, alors que la concurrence y est rude ? Ces quelques mystères sociobiologiques continueront de fasciner les biologistes pendant bien des années. ■

La préhistoire des trous noirs

JEAN EISENSTAEDT

Les corps obscurs, précurseurs newtoniens des trous noirs, ont été pensés dès la fin du XVIIIe siècle dans le cadre de la théorie de la gravitation universelle.

C'est dans les années 1960 que naît, dans le contexte de la relativité générale établie par Einstein à la fin de 1915, le concept de trou noir ; l'expression inventée en 1968 par John Wheeler fit bientôt fortune. D'un point de vue théorique, ce concept s'appuie sur deux phénomènes majeurs qu'expriment assez bien les deux termes de leur nom. Noirs, ils le sont car la masse de l'étoile effondrée est supposée suffisamment importante pour qu'aucun rayon lumineux ne puisse s'en échapper ; quant à l'idée de « trou » elle est là pour signifier que l'espace physico-géométrique de la relativité générale est tellement courbé par la gravitation qu'il s'est déchiré, refermé sur lui-même : la structure topologique de l'espace-temps, sa géométrie, prend des allures étranges.

Ainsi n'est-il pas très étonnant que l'histoire des trous noirs soit d'abord celle de la difficulté, des obstacles que les spécialistes de la relativité générale ont rencontrés pour imaginer précisément cet objet. Un objet qui n'est pourtant encore aujourd'hui essentiellement qu'un concept de la théorie de la gravitation d'Einstein, puisque aucun objet céleste n'a encore été détecté dont on puisse assurer qu'il s'agit bien d'un trou noir.

Or, à la surprise des spécialistes de la relativité générale qui ont d'abord cru en être les inventeurs, il est bientôt apparu aux historiens des sciences que les trous noirs ont une préhistoire qui se confond avec l'histoire, oubliée elle aussi, de l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière au XVIIIe siècle.

La lumière, une obsession d'Einstein

Assez généralement, on fait commencer l'histoire de l'influence de la gravitation sur la propagation de la lumière en 1907, avec l'essai d'Einstein sur le principe de relativité, un article de synthèse de la toute récente relativité restreinte, commandé par Johannes Stark, éditeur du *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*. Einstein vient de prendre conscience que tous les phénomènes naturels peuvent être pensés en terme de relativité restreinte sauf la gravitation. Aussi, dans la toute dernière partie de son article, s'interroge-t-il sur l'influence de la gravitation sur les processus électromagnétiques ; il en déduit que les rayons lumineux doivent être courbés par le champ gravitationnel.

Mais l'intérêt d'Einstein pour les questions relatives à la lumière date de plus loin ; c'est même une obsession. Dès son adolescence, il se demande ce qu'il observerait s'il parvenait à poursuivre à la vitesse c, un rayon de lumière. Et en 1905, deux de ses plus prestigieux articles révolutionnent la vision classique de la lumière.

Dans l'un, afin de permettre l'interprétation de l'effet photoélectrique, Einstein propose son hypothèse « heuristique » des quanta de lumière, tandis qu'il fonde son « électrodynamique des corps en mouvement » – que nous avons pris la fâcheuse habitude de nommer « relativité restreinte » – sur le principe de constance de la vitesse de la lumière. Le principe d'équivalence, exprimé précisément dans l'article de 1907 sous la forme de « l'équivalence totale du champ de gravitation et de l'accélération correspondante du système de référence », lui permet de poser la question de l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière.

En 1911, lors de son séjour à Prague, il réexamine l'effet de la gravitation sur la propagation de la lumière, d'une part parce que sa présentation de 1907 ne le satisfait guère, mais aussi parce qu'il vient de prendre conscience que la courbure des rayons lumineux peut « être testée expérimentalement » au voisinage du Soleil éclipsé. Le calcul heuristique qu'il propose alors, fondé sur le principe de Huygens, le conduit à la prévision d'une déviation d'un rayon lumineux au bord du Soleil de 83 secondes d'arc. Mais le chemin est encore long qui le mènera à la relativité générale et, lorsque fin 1915, Einstein publiera les équations définitives de sa théorie de gravitation, ses calculs donneront à la déviation au bord du Soleil une valeur double de celle qu'il proposait en 1911. Telle sera bien la valeur – l'ordre de grandeur – des observations qui, effectuées par Dyson et Eddington en 1919 à l'occasion d'une éclipse de Soleil, confirmeront la théorie. Quelques mois plus tard, lors d'une séance émouvante à la *Royal Society*, les scientifiques anglais reconnaîtront l'avènement de la nouvelle théorie de la gravitation. Mais la relativité générale, exigeante à tant de points de vue, sera pour beaucoup de scientifiques, difficile à accepter sinon à comprendre. Sa réception, sa diffusion dans le milieu scientifique ne se feront pas très aisément.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

De Lenard à Soldner : l'histoire prise à partie

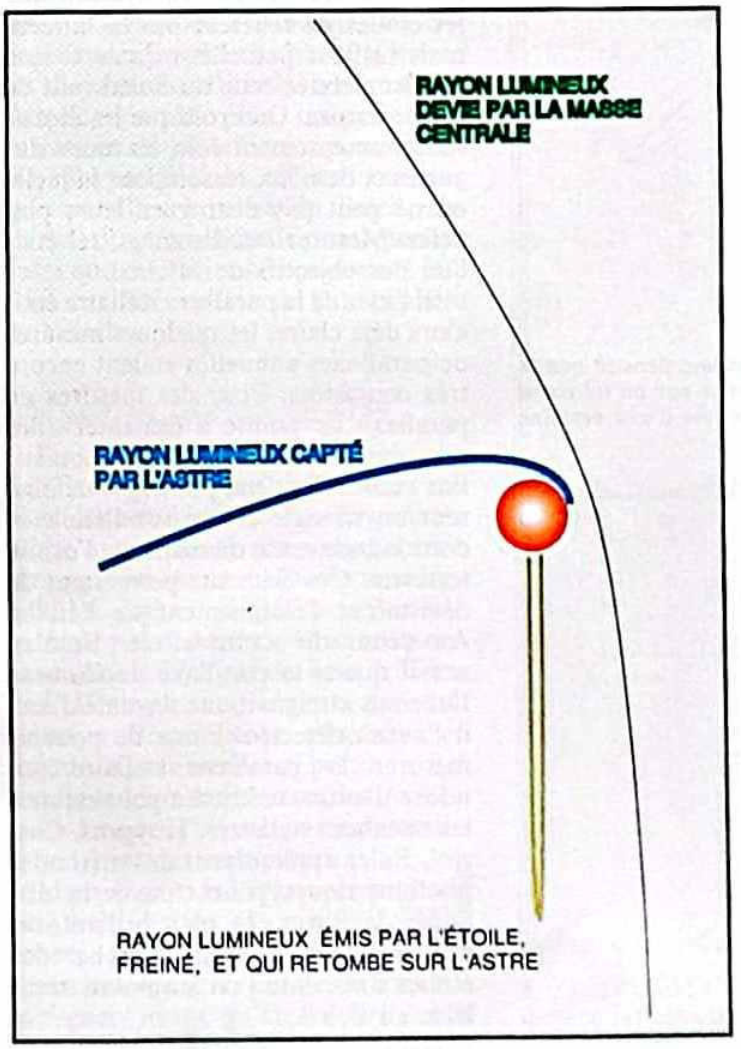
Les motivations de Philip Lenard ne sont guère comparables. Au début des années 1920, il mènera en Allemagne une sombre campagne « anti-relativiste » au relent anti-sémite. Une campagne qui, relayée par quelques-uns de ses confrères, s'appuiera en particulier sur un très ancien article qu'il ressort de l'ombre. Il s'agit d'un article datant de 1801, signé par Johann Georg von Soldner, assitant de l'astronome royal de Prusse et éditeur de l'*Astronomisches Jahrbuch*, Johann Elert von Bode. Dans le contexte de la théorie de la gravitation – mais aussi de l'optique corpusculaire – newtonienne, celui-ci avait non seulement prévu mais aussi calculé la courbure des rayons lumineux au bord d'un astre. En 1921, Lenard publiera à nouveau l'article de Soldner dans *Annalen der Physik*, non sans laisser entendre qu'Einstein a tiré son idée de l'article de Soldner.

En fait, l'histoire de l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière remonte à 1772 avec la publication dans *L'Histoire de l'optique*, de Joseph Priestley, du compte rendu d'un calcul consacré à cette question, travail de John Michell, « philosophe anglais de la nature » et ami de Cavendish. C'est à partir de cette première analyse que Michell va inventer quelques années plus tard ces objets que Laplace nommera « corps obscurs » et qui ne sont pas sans avoir quelques caractéristiques des « trous noirs », mais il n'y a pourtant aucun lien historique qui aille des corps obscurs de Laplace aux trous noirs de Wheeler ; tout au contraire, il y a un « trou » de plus d'un siècle qui va grosso modo du début du XIX^{e} siècle à celui du XX^{e} siècle et qui correspond très précisément à l'effacement de la théorie corpusculaire face à la théorie ondulatoire de la lumière et à un oubli total des travaux newtoniens relatifs à l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière. Aussi bien il ne semble vraiment pas qu'il y ait eu quelque emprunt des relativistes à leurs collègues du XVIII^{e} siècle.

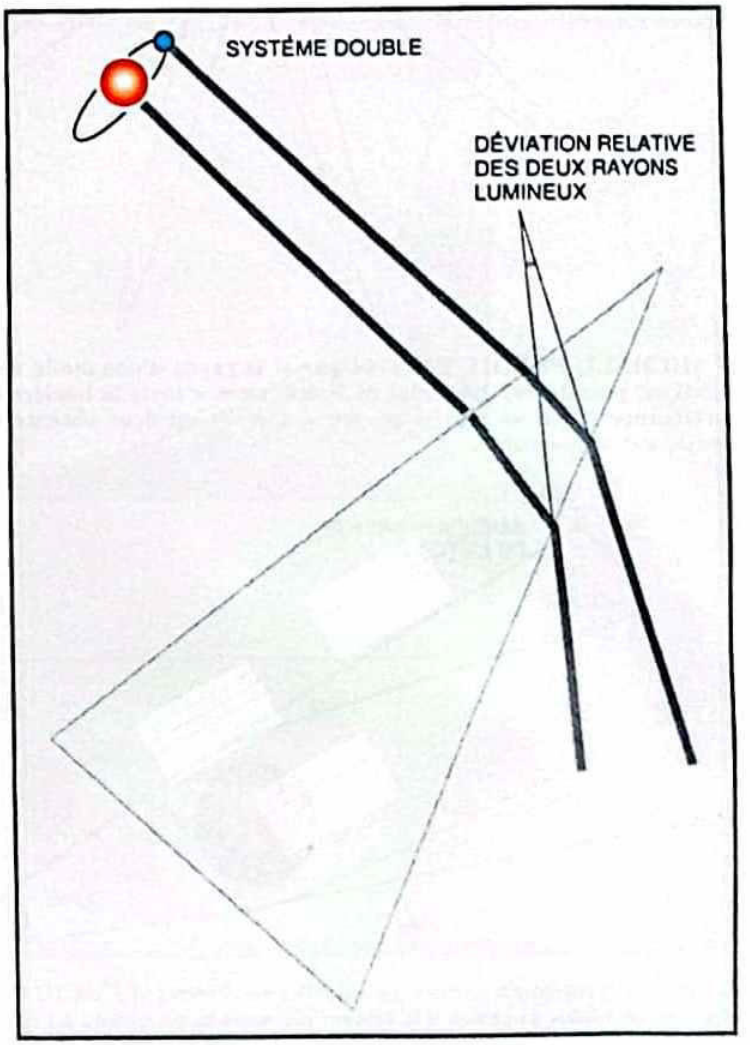
Ainsi les trous noirs ne sont pas l'ultime avatar d'une théorie ténébreuse, la relativité générale, dont la réputation d'incompréhensibilité n'est plus à faire. D'une manière incroyablement simple, une de leur caractéristique majeure, l'obscurité a été pensée dès la fin du XVIII^{e} siècle dans le cadre de la théorie de la gravitation universelle de Newton...

L'unité du monde newtonien

Le principe newtonien de l'unité du monde suppose que tous les corps doivent être sujets au principe de gravitation. Pourtant, au XVIII^{e} siècle, l'action de la gravité n'avait pas été observée dans trois domaines limites : la gravité des étoiles « fixes », l'attraction mutuelle des corps terrestres et la gravitation de la lumière. Dans *L'Optique* qui paraît en 1704 en latin, et plus précisément dans les « Questions qui servent de conclusion à tout l'ouvrage », Newton se demandera si les corps n'agissent pas « à



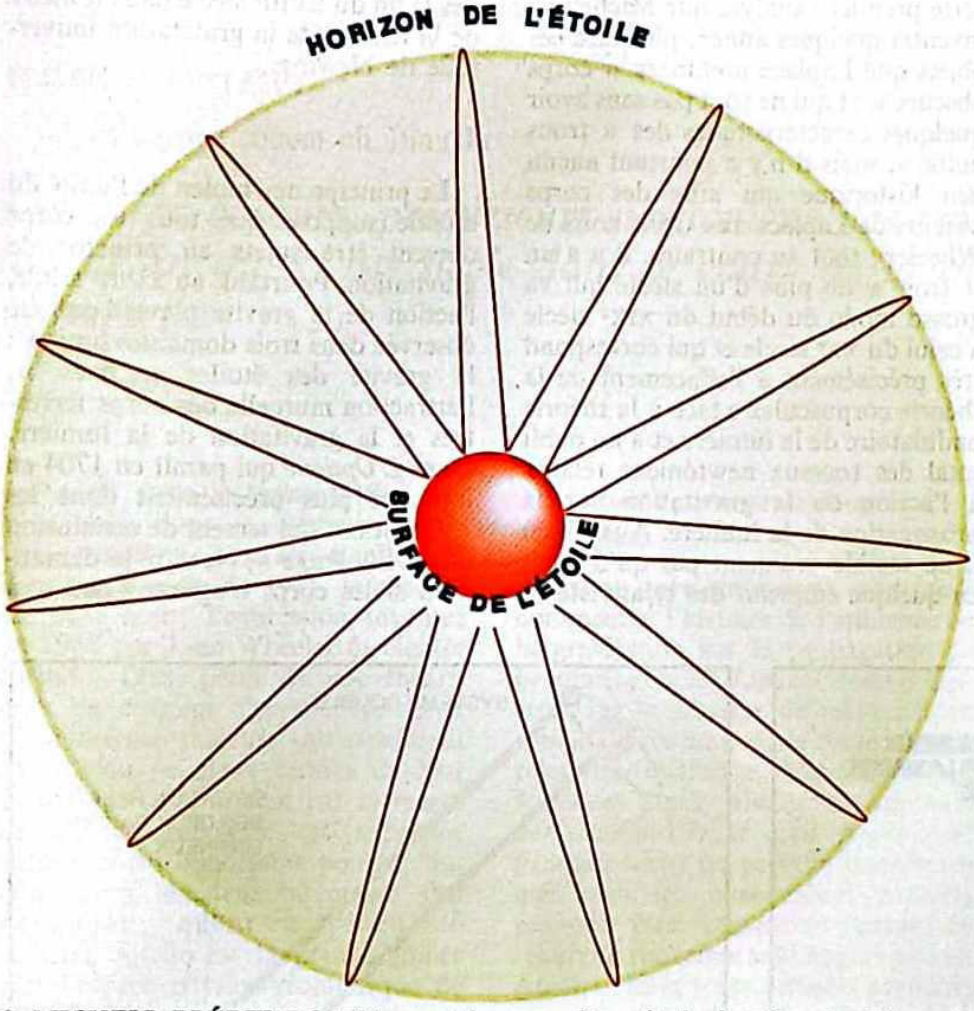
1. LE RAYON LUMINEUX, issu de l'étoile centrale très massive d'un système d'étoile double, sera plus dévié par le prisme que celui de son compagnon moins massif. La déviation dans le prisme dépend de la vitesse et donc, à travers l'effet Michell, de la masse de l'étoile ayant émis le corpucule lumineux.



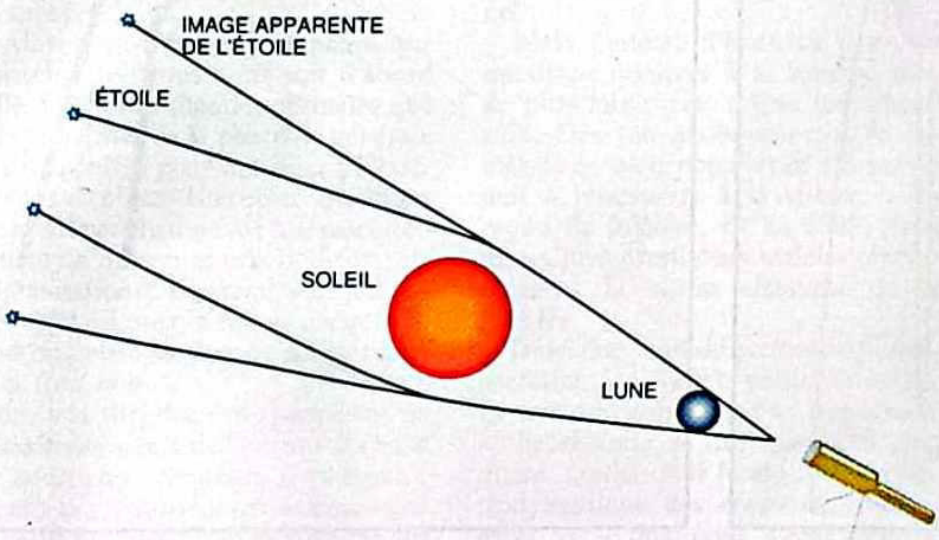
2. AU XVIII^{e} SIÈCLE, on imagine trois effets de la gravitation sur la lumière. En 1772, Michell prévoit le freinage gravitationnel de la lumière émise par une étoile. Vers 1784, Cavendish imagine la déviation de la lumière par un corps massif et, en 1791, Herschel pense que la lumière peut être captée par une nébuleuse planétaire.

certaine distance, sur la lumière », car il croit que la réfraction est un phénomène d'attraction. Il ne poursuivra pourtant cette idée que dans les actions à courte portée.

C'est à cette hypothétique action – à longue portée – de la gravitation sur la propagation de la lumière que se consacra, dans la seconde partie de sa vie, le révérend John Michell. Son ami Henry Cavendish l'encouragea dans ses recherches tout particulièrement pour ce qui concerne les questions expérimentales et il poursuivit même des recherches qui le menèrent à la formule de l'effet de déviation de la lumière par un corps. Cavendish et Michell tentèrent essentiellement d'étendre les résultats de Newton : la force de gravitation étant connue, il s'agissait d'en déduire de nouveaux phénomènes. Il faut aussi rappeler que ce fut Michell qui, en 1750, exprima correctement les propriétés mathématiques de la force magnétique et en particulier la loi en $1/r^2$. Cavendish dans sa théorie électrique de 1771 établira sans la publier la loi complète des attractions et des répulsions électriques que Priestley inclura dans son *Histoire de l'optique* l'année suivante. C'est encore à Michell que l'on doit la première balance de torsion à partir de laquelle Cavendish réalisa sa célèbre expérience.



3. MICHELL PRÉDIT EN 1784 que si le rayon d'une étoile de même densité que le Soleil est plus de 497 fois celui du Soleil, alors « toute la lumière émise par un tel corps y retournerait par sa gravité propre ». L'étoile est donc obscure au-delà d'une certaine limite, son « horizon ».



4. LES CORPUSCULES LUMINEUX émis par des étoiles sont déviés par la masse du Soleil. Le phénomène de déviation n'est observable que lors d'une éclipse, lorsque la Lune occulte le Soleil. En dehors des éclipses, les rayons lumineux issus de l'étoile sont noyés dans la lumière solaire.

Les étoiles et la gravitation au XVIII^e siècle

Au XVIII^e siècle le rôle du Créateur dans la conception du monde perd de son importance et les hommes de science veulent découvrir les mystères non révélés de la nature. On sait que les étoiles ne reflètent pas la lumière mais brillent par elles-mêmes et que leur lumière et celle du Soleil sont de même nature. On croit que les étoiles sont immensément loin les unes des autres et de nous, raison pour laquelle on ne peut pas distinguer leurs planètes. Mesurer ces distances, tel était l'un des objectifs de Michell.

Si l'idée de la parallaxe stellaire était alors déjà claire, les quelques mesures de parallaxes annuelles étaient encore très contestées. Pour ces mesures de parallaxe on pointe à des intervalles séparés par six mois le télescope sur une étoile. Ces deux pointages définissent un triangle centré sur l'étoile et dont la base est le diamètre de l'orbite terrestre. Ces éléments permettent de déterminer l'éloignement de l'étoile. Au début du XVIII^e siècle, Bradley notait que si la parallaxe de Gamma Draconis atteignait une seconde d'arc, il l'aurait détectée. Faute de pouvoir mesurer la parallaxe stellaire, on utilisa d'autres méthodes pour estimer les distances stellaires. Huygens, Cassini, Euler appliquèrent des méthodes photométriques pour trouver la distance de Sirius, la plus brillante et probablement la plus proche des étoiles fixes, que l'on supposait similaire au Soleil.

Dans cette « optique », la théorie de la gravitation universelle de Newton posait deux problèmes essentiels à l'astronome du XVIII^e siècle : la première était de savoir pourquoi les

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

étoiles ne s'effondrent pas les unes sur les autres sous le poids de leur attraction mutuelle ; la seconde, qui lui était liée, était de déterminer leur distribution tridimensionnelle. Newton supposait que les étoiles étaient trop distantes pour être affectées par leurs attractions, ou encore que le milieu interstellaire était solide. Une explication plus subtile était liée au caractère fini ou infini de la création. Si les étoiles sont en nombre fini, elles s'effondreront finalement quelles que soient leurs séparations initiales ; si la création est infinie, objectait-on à l'époque, alors les attractions s'annuleront par symétrie... Un autre type d'explication était d'envisager qu'à longue portée la force gravitationnelle devenait répulsive... Ou encore on faisait intervenir, comme le fit Thomas Wright, des forces centrifuges en supposant une rotation des étoiles composant la Voie lactée...

Bien d'autres questions intéressaient alors les spécialistes : les raisons des variations des étoiles, leur constitution, leur distribution dans le milieu interstellaire et leur gravité, la nature des nébuleuses. Mais surtout les variations d'éclat, les explosions, les décroissances, les fluctuations, ou même les disparitions d'étoiles intriguaient ; l'explication la plus courante des variations de la lumière reposait alors sur l'hypothèse de taches sombres, qui, pareilles à celles du Soleil, auraient obscurci l'étoile ; on pensait aussi que ces variations pouvaient être liées aux fluctuations de l'atmosphère de l'étoile.

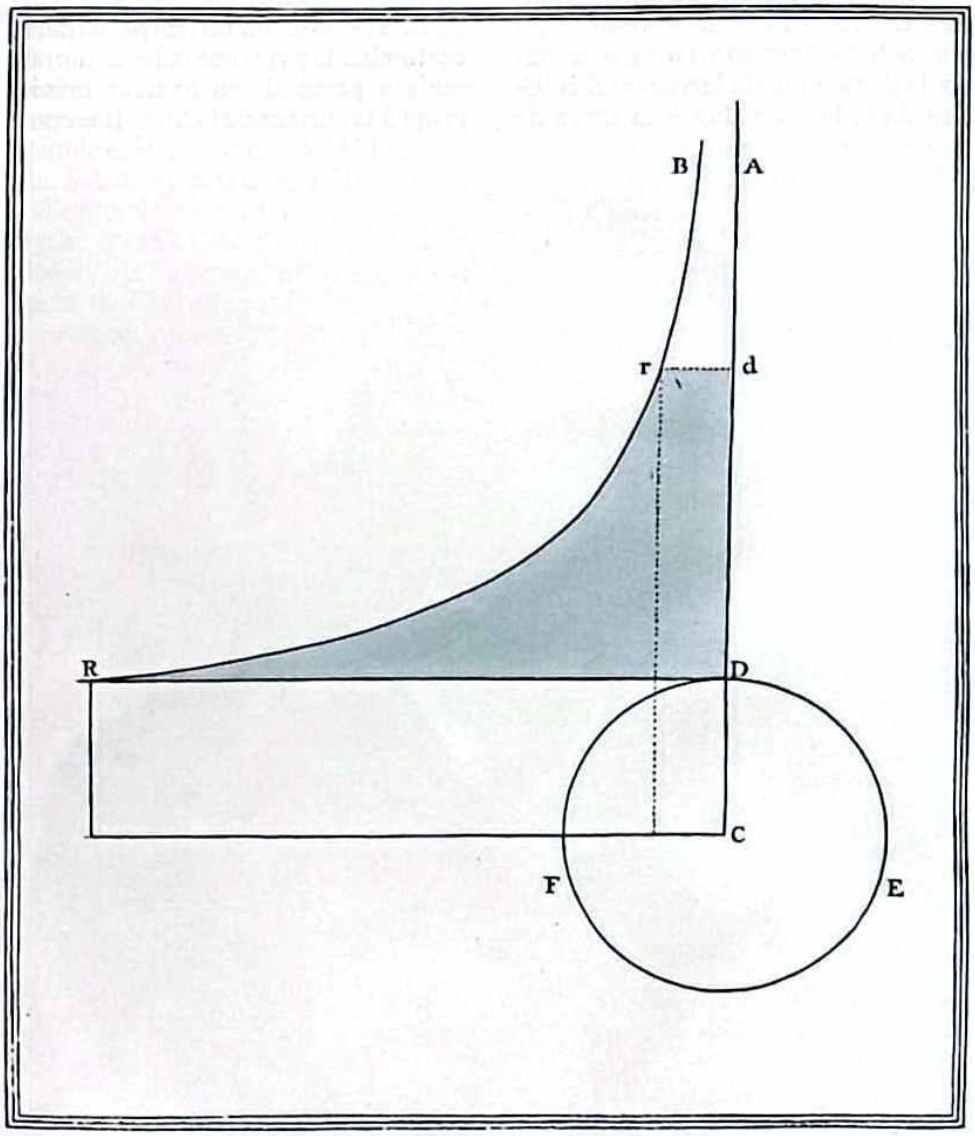
L'article de Michell de 1784

En 1784, paraît dans les *Philosophical Transactions* un article de Michell dans lequel il développe l'hypothèse d'une action de la gravitation sur la propagation de la lumière, une idée qu'il a déjà exprimée – et même quelque peu élaborée – 12 ans auparavant dans *L'Optique* de Joseph Priestley. Il s'agit en quelque sorte d'un principe d'équivalence généralisé en théorie newtonienne : pour ce qui concerne leurs trajectoires, les corpuscules lumineux se comportent comme les corpuscules matériels.

Michell part de l'argument probabiliste exposé dans son article de 1767 concernant les groupements d'étoiles, argument qu'il a été le premier à souligner, avant qu'Herschel l'établît par l'observation. Michell montrait que ce n'était pas par hasard que bien des étoiles semblaient groupées dans le ciel mais bien parce qu'elles étaient gravitationnellement liées dans des amas. Ainsi affirme-t-il avec beaucoup de force l'existence d'un très grand nombre de « systèmes d'étoiles si proches l'une de l'autre qu'elles sont probablement sujettes à être affectées d'une manière appréciable par leur gravitation mutuelle ; et il n'est donc pas improbable que les périodes de révolutions de certaines d'entre elles [...] puissent un jour ou l'autre être découvertes. »

L'intérêt premier de Michell est en effet d'acquérir une meilleure connaissance des étoiles fixes, de leurs masses, de leurs distances, de leurs magnitudes ; il voit, à juste titre, dans les systèmes d'étoiles doubles, un excellent moyen pour cela. En effet l'observation de la période et de l'élongation maximale d'un système d'étoiles doubles permettrait, grâce à l'application de la troisième loi de Kepler, de connaître la masse du système pourvu que l'on en connût la distance à la Terre. Pour Michell, la mesure de la diminution de la vitesse de la lumière due à l'attraction du Soleil permettrait de déterminer la masse et la distance de certaines étoiles. Tel sera le sens de son article de 1784. Il faut pourtant dire que la possession de ces données était alors totalement hypothétique, l'existence même de tels systèmes étant loin d'être claire malgré les observations de Cassini.

Comme les *Principia* de Newton auxquels il est bien entendu fait référence, l'article de Michell est structuré en propositions ou corollaires, exprimés d'une manière géométrique. Dès sa quatrième proposition, Michell « suppose que les particules



5. LE SCHÉMA DE MICHELL permet de calculer la vitesse d'une particule qui se déplace radialement dans un champ de gravité. La courbe *BR* donne la valeur de la force gravitationnelle par unité de masse, en fonction de la distance. Ainsi la particule située en *d*, distante de *Dd* de la surface *DFE* de l'étoile, subit une force radiale de grandeur *rd*. La vitesse acquise en *D* par un corps partant du repos en *d* sera proportionnelle à la racine carrée de l'aire curviligne *drRD (en grisé)*. En fait, dans le cas particulier d'un mouvement radial, tout se passe comme si Michell disposait du théorème de conservation de l'énergie pour une particule libre.

de lumière sont attirées de la même manière que les autres corps ». Notons qu'il pose ainsi parfaitement bien et pour la première fois les bases de la théorie de l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière dans un cadre newtonien. Et il faut dire que cette hypothèse est, dans le cadre des théories de Newton – optique et gravitation – parfaitement raisonnable, sinon même, nécessaire.

Ainsi Michell calcule-t-il « la diminution que la vitesse de la lumière va subir par l'attraction du Soleil ». De la connaissance de cette diminution, il espère déduire la masse du Soleil ou, plus généralement, celle de l'étoile source du corpuscule lumineux. En effet, pour Michell, selon son hypothèse, un corpuscule lumineux se comporte comme n'importe quel corpuscule matériel émis à la surface de l'étoile avec une vitesse donnée, *c*.

À partir de cette hypothèse fondamentale, son travail se développe en propositions diverses visant à déterminer la diminution de la vitesse d'émission de la lumière due à la force de gravitation du Soleil. En fait, dans le cas particulier d'un mouvement radial, tout se passe comme si Michell disposait du théorème de conservation de l'énergie pour une particule libre, appliqué à la force gravitationnelle par « unité de masse » : le carré de la vitesse diminuée est égal au carré de la vitesse d'émission moins le carré de la vitesse qu'un corps aurait acquis en tombant d'une hauteur infinie sur la surface du Soleil, vitesse qui n'est bien sûr autre que la vitesse de libération.

Le raisonnement de Michell, qui s'appuie sur la 39e proposition du livre 1 des *Principia* de Newton, nous est donné en termes géométriques à partir d'un diagramme exprimant la force de gravitation à laquelle un corps, en mouvement radial dans le champ d'une étoile est soumis *(voir la figure 1)*.

Michell démontre alors une série de propositions et de corollaires concernant la vitesse qu'un corps acquiert en tombant, avec une vitesse initiale nulle à partir d'une hauteur infinie, jusqu'à la surface de l'étoile. Il montre que cette vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la densité et au rayon du corps central. Ainsi détermine-t-il tout d'abord explicitement « la vitesse qu'un corps acquerrait en tombant d'une hauteur infinie vers le Soleil lorsqu'il arriverait à sa surface », vitesse qu'il estime être de 20,72 fois celle de la Terre sur son orbite. Comme la vitesse de la lumière excède celle de la Terre sur son orbite « dans la proportion de 10 310 à 1 », il en déduit que la vitesse de la lumière excède la vitesse qu'un corps pourrait acquérir en tombant d'une hauteur infinie sur le Soleil dans une proportion de 10 310/20,72 = 497 fois.

S'appuyant sur ce dernier résultat, Michell remarque que si le rayon d'une sphère de même densité que le Soleil dépassait le rayon de celui-ci dans une proportion de 1 à 500, alors : « un corps, tombant d'une hauteur infinie vers lui, aurait acquis à sa surface une plus grande vitesse que celle de la lumière ». Il ajoute, en inversant le phénomène : « supposant que la lumière soit attirée par la même force en proportion de sa *vis inertiae*, comme d'autre corps, toute la lumière émise par un tel corps y retournerait, par sa véritable gravité propre ».

Telle est la remarque par laquelle Michell a clairement fondé le concept de « corps obscur », un terme que nous devons à Laplace et qui, dans le contexte newtonien, est de très loin préférable à celui de « trou noir ». L'effet physique lui-même est très simple puisque, ainsi que nous l'explique fort bien Michell, le corpuscule lumineux en question n'a pas un comportement qualitativement différent de celui d'une pierre que l'on lance en l'air et qui, petit à petit, est freinée jusqu'à s'arrêter et finalement retourner sur le corps central d'où elle a été lancée.

Michell ne s'arrêtera pas à ces considérations, pourtant déjà élaborées ; dans la proposition suivante, il traite du cas d'une étoile dont la masse ne serait pas suffisamment importante pour retenir totalement la lumière d'un corps mais en réduirait seulement la vitesse : « Mais si le rayon d'une sphère, de même densité que le Soleil était de quelque autre dimension que 497 fois celle du Soleil, bien que la vitesse de la lumière émise par un tel corps ne puisse être complètement anéantie, elle n'en souffrirait pas moins quelque diminution, en plus ou en moins, suivant la taille de ladite sphère. »

Un peu plus loin, Michell va expliciter un trait essentiel des corps obscurs qui deviendra une caractéristique fon-

6. LE RÉVÉREND JOHN MICHELL (1724-1793).

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

damentale des trous noirs : que leur inobservabilité n'est que visuelle et que bien qu'invisibles, ils doivent faire sentir leurs effets gravitationnels. En effet, les corps obscurs sont certes invisibles, ils ne sont pourtant pas inobservables : aussi bien leur champ gravitationnel n'est-il pas sans effet sur d'éventuels compagnons.

« S'il existait vraiment dans la nature des corps dont la densité ne serait pas moindre que celle du Soleil et dont les diamètres seraient au moins 500 fois le diamètre du Soleil, leur lumière ne pourrait pas nous parvenir ; ou s'il existait d'autres corps d'une taille quelque peu inférieure, qui ne seraient pas naturellement lumineux ; de l'existence de ces corps sous l'une ou l'autre de ces circonstances, nous ne pourrions avoir d'information par la vue ; pourtant s'il arrivait que quelque autre corps lumineux tourne autour d'eux, des mouvements de ces corps tournants nous pourrions peut-être encore déduire l'existence du corps central avec quelque degré de probabilité ; aussi bien cela pourrait nous apporter une indication concernant quelques-unes des irrégularités des corps tournants, qui ne serait aisément explicable par aucune autre hypothèse ; mais comme les conséquences d'une telle supposition sont tout à fait évidentes, et leurs considérations quelque peu en dehors de mon but actuel, je ne les poursuivrai pas plus avant. »

Il faut souligner ici l'extraordinaire qualité épistémologique de ce texte et en particulier la modernité de la structure logique ; déjà, les bases épistémologiques de la découverte de Neptune à travers les irrégularités d'Uranus sont clairement posées et acceptées ; la confiance de Michell en la théorie de Newton est tout à fait extraordinaire, ainsi imagine-t-il qu'un astre obscur puisse expliquer un jour les irrégularités de quelque planète. Il ne semble pourtant pas que cette idée ait jamais été reprise dans un cadre classique, ni pour tenter d'expliquer les irrégularités d'Uranus, ni celles de Mercure, lesquelles, comme on le sait, entraîneront bien plus tard la remise en question de la théorie newtonienne.

Il n'est sans doute pas inutile d'opposer ici, ne serait-ce que schématiquement, les caractéristiques techniques des « trous noirs » face à celles des « corps obscurs ». Il faut avant tout dire que l'effet physique – lié à l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière – est évidemment de même nature dans les deux théories et est donc aux fondements mêmes de la question : la lumière émise est piégée par le champ gravitationnel du corps central. C'est ce point essentiel qui justifie, à deux siècles d'intervalle, le rapprochement entre ces travaux. Toutefois il faut dire avec force que la théorie d'Einstein implique une vision de l'espace-temps qui n'est aucunement réductible à celle de Newton.

Les tentatives observationnelles

Dans la seconde partie de son article, afin « d'illustrer cette matière », Michell élabore un modèle représentant un système d'étoiles doubles dont il donne les paramètres essentiels. L'étoile centrale a la densité du Soleil ; son compagnon, en orbite autour d'elle, a une période de 64 ans. Il suppose aussi que la vitesse de la lumière de l'étoile centrale « a été trouvée être inférieure à celle du Soleil, dans la proportion de 19 à 20 » et que le diamètre apparent du système double vu de la Terre est de une seconde d'arc. Ainsi le diamètre de l'étoile centrale est égal à 155 fois celui du Soleil, sa masse à 3 738 308 fois celle du Soleil *(sic)*. Sa distance est égale à 512 196 750 fois celle du Soleil ; la lumière de cette étoile mettrait 7900 ans pour nous parvenir « avec sa vitesse commune », tandis qu'en raison de la diminution de cette vitesse due à son propre champ d'attraction, elle mettra 395 ans de plus (1/20), et ajoute-t-il, « en supposant qu'une telle étoile soit aussi lumineuse que le Soleil, elle serait encore facilement visible à l'œil nu, je le pense, malgré son immense distance ».

À partir de ce modèle, Michell imaginera un dispositif très ingénieux pour tester son effet, utilisant un prisme. Il s'agit d'évaluer la diminution subie par la vitesse de la lumière de l'étoile centrale, la vitesse de la lumière de l'étoile satellite, peu massive, n'étant pas affectée par l'effet. Car, conformément à l'optique de Newton sur laquelle Michell s'appuie explicitement, la réfraction est inversement proportionnelle à la vitesse de la lumière dans les milieux traversés ; ainsi la lumière de l'étoile centrale sera-t-elle plus réfractée que celle de l'étoile satellite. On devait donc observer une variation de la séparation angulaire entre les deux étoiles après la traversée du prisme. À partir des données de son modèle, Michell prévoit une séparation angulaire liée à son effet de freinage gravitationnel de 2,53 secondes.

À la fin de son article, Michell tentera de juger de la probabilité – et ce n'est pas chez lui un vain mot – de détecter son effet ; ainsi souligne-t-il

EXPOSITION

DU SYSTEME

DU MONDE,

PAR PIERRE-SIMON LAPLACE,
de l'Institut National de France, et du Bureau des Longitudes.

TOME SECOND.

A PARIS,

De l'Imprimerie du CERCLE-SOCIAL, rue du Théâtre Français, N°. 4.

L'AN IV DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE.

(305)

aussi sensibles à la distance qui nous en sépare ; et combien ils doivent surpasser ceux que nous observons à la surface du soleil ? Tous ces corps devenus invisibles, sont à la même place où ils ont été observés, puisqu'ils n'en ont point changé, durant leur apparition ; il existe donc dans les espaces célestes, des corps obscurs aussi considérables, et peut être en aussi grand nombre, que les étoiles. Un astre lumineux de même densité que la terre, et dont le diamètre serait deux cents cinquante fois plus grand que celui du soleil, ne laisserait en vertu de son attraction, parvenir aucun de ses rayons jusqu'à nous ; il est donc possible que les plus grands corps lumineux de l'univers, soient par cela même, invisibles. Une étoile qui, sans être de cette grandeur, surpasserait considérablement le soleil ; affaiblirait sensiblement la vitesse de la lumière, et augmenterait ainsi l'étendue de son aberration. Cette différence dans l'aberration des étoiles ; un catalogue de celles qui ne font que paraître, et leur position observée au moment de leur éclat passager ; la détermination de toutes les étoiles changeantes,

Tome II. V

7. LAPLACE reprend la thèse de l'affaiblissement de la vitesse de la lumière.

les différents facteurs dont dépend le succès de l'entreprise et les conséquences qu'on en peut espérer. Il s'agit d'abord de mieux connaître les systèmes d'étoiles doubles observés par Herschel, observations qui – tout au moins l'espère-t-il fermement – montreront qu'il s'agit bien de systèmes physiques gravitationnellement liés ; des observations qui posent avant tout des problèmes... de personnel : « Quoiqu'il soit probable que, dans les années qui viennent, on apprenne que, parmi le grand nombre d'étoiles doubles, triples, etc. qui ont été observées par Mr. Herschel, certaines étoiles sont des systèmes de corps tournant l'un autour de l'autre, tout particulièrement si quelques observateurs de plus, aussi ingénieux et habiles que lui-même pouvaient être trouvés pour le seconder dans ses travaux. »

Ces observations demanderont beaucoup de patience à cause de la très longue période de révolution des étoiles secondaires : « La très grande distance, à laquelle il n'est pas invraisemblable que beaucoup de ces étoiles secondaires soient situées de leurs principales, et les très longues périodes de révolution consécutives, laissent très peu de chance qu'aucun grand progrès puisse être fait sur ce sujet avant quelques années ou même avant longtemps. »

C'est donc un projet à long terme que Michell défend, un projet qui pose non seulement la question de l'observation de l'effet, mais aussi et d'abord celle de l'observation des mouvements propres d'étoiles ; un projet dont il rappelle très clairement les hypothèses essentielles, c'est-à-dire « que les particules de lumière soient bien sujettes à la même loi de gravitation que les autres corps » et que « quelques-unes de ces étoiles soient assez grandes pour diminuer sensiblement leur vitesse » ; il espère fortement que les résultats escomptés « seront un encouragement à ceux qui ont en leur pouvoir de faire ces observations, tout au moins pour le bénéfice des générations futures, quelque petit que puisse être l'avantage que nous pouvons en attendre pour nous-mêmes. »

Dès le printemps de 1783, Michell soumet son texte à Cavendish qui se préoccupe du meilleur appareil pour détecter la « lumière réduite », et dès l'été suivant, avant la lecture officielle du texte devant la *Royal Society*, le papier de Michell suscitait un assez grand intérêt ; bientôt, Cavendish et Maskelyne s'intéresseront aux conséquences observables de l'effet : une lunette astronomique ne serait-elle pas un meilleur instrument que le prisme ? Des observations de ce type furent réalisées par Maskelyne et par Herschel durant l'été de 1783 sur « un bon nombre d'étoiles » mais sans succès, et Herschel polira même un prisme pour tenter aussi l'expérience... Cavendish conclura sa lettre du 12 août en notant « qu'il y avait peu de chance de trouver aucune étoile dont la lumière serait sensiblement diminuée ». Dans une lettre à Cavendish, John Michell évoque deux hypothèses pour expliquer un échec probable. La première c'est « qu'il n'existe pas d'étoiles assez grandes pour produire quelque effet appréciable » ; la seconde met en cause l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière elle-même : « Il est aussi tout simplement possible que la lumière (et peut-être aussi le fluide électrique, qui semble lui être lié jusqu'à un certain point, etc.) ne soit pas aussi affectée par la gravité, en proportion de sa *vis inertia*, que les autres corps ; mais bien que je sois très porté à croire que ce ne soit pas le cas, les propriétés singulières que ces substances possèdent semblent laisser à leur sujet un peu plus de place au doute que dans d'autres sortes de matières plus communes. »

C'est là une analyse particulièrement fine des possibilités et des limites de ses propres hypothèses. Ces questions judicieuses... feront leur chemin.

Ainsi, pour ce qui concerne l'intuition physique, l'expression mathématique, la réalisation expérimentale, le travail de Michell est sans aucun doute parfaitement au point. C'est d'ailleurs bien ce qui fait aujourd'hui son intérêt : dans le cadre des théories alors dominantes, l'excellente intuition d'une interaction essentielle, l'expression précise d'un effet tendant à la mettre en valeur et sa réalisation technique parfaite. Que pouvait-on lui demander de plus ? Toute la structure physico-mathématique de la théorie de la gravitation universelle mais aussi celle de la théorie de la lumière de Newton, toute la machinerie observationnelle de l'époque ont été magnifiquement mobilisées... sur un leurre.

Car, tout est ici parfait dans les détails, mais des deux théories sur lesquelles Michell s'appuie, l'une d'elles, l'optique, est tout à fait insuffisante et même bientôt défaillante. Il est certain que les travaux évidemment essentiels concernant l'optique au tout début du XIX[e] siècle, qui feront triompher une vision ondulatoire de la lumière, ne seront pas pour rien dans l'oubli où tombera la théorie de l'action de la gravitation sur la lumière de Michell, et cela malgré la publicité que lui fera Laplace.

Quant à sa prédiction concernant les astres obscurs, elle tendrait facilement aujourd'hui à prendre le pas sur

VII. *On the Means of diſcovering the Diſtance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in conſequence of the Diminution of the Velocity of their Light, in caſe ſuch a Diminution ſhould be found to take place in any of them, and ſuch other Data ſhould be procured from Obſervations, as would be farther neceſſary for that Purpoſe. By the Rev.* John Michell, *B. D. F. R. S. In a Letter to* Henry Cavendiſh, *Eſq. F. R. S. and A. S.*

Read November 27, 1783.

16. Hence, according to article 10, if the ſemi-diameter of a ſphære of the ſame denſity with the ſun were to exceed that of the ſun in the proportion of 500 to 1, a body falling from an infinite height towards it, would have acquired at its ſurface a greater velocity than that of light, and conſequently, ſuppoſing light to be attracted by the ſame force in proportion to its vis inertiæ, with other bodies, all light emitted from ſuch a body would be made to return towards it, by its own proper gravity.

8. MICHELL prédit l'existence des corps obscurs.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

le sérieux, sur la cohérence du travail du physicien-théoricien. Il faut pourtant dire qu'il ne s'agit certainement pas de quelque visionnaire ayant inventé les trous noirs un soir de pleine lune, mais d'un excellent artisan des techniques newtoniennes ayant poussé jusqu'à ses justes limites un effet parfaitement raisonnable.

La lumière courbée et capturée...

C'est sans doute après qu'il se fut convaincu que l'effet Michell était inobservable que Cavendish se tourna vers la courbure de la lumière pour mettre en évidence l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière. Dans un manuscrit non daté, mais sans doute réalisé vers 1784-1785, Cavendish pose et résout très précisément le problème de « la courbure d'un rayon de lumière qui passe près de la surface de quelque corps et due à l'attraction de ce corps ». Ses calculs ne nous sont malheureusement pas parvenus, mais son résultat est parfaitement correct dans le cadre de la théorie de Newton, et précède donc celui de Soldner de près de 15 ans.

Le thème de la capture de la lumière des étoiles par gravité constitue l'un des thèmes de l'article que Herschel consacrera en 1791 aux nébuleuses planétaires. Il s'agit pour celui-ci d'objets étranges « dont la nébulosité entourant l'étoile n'est pas de nature stellaire », de corps qu'il nous décrit avec la précision d'un entomologiste. Aussi bien, très poétiquement, se dit-il : « dans la situation d'un philosophe de la nature qui suivrait les diverses espèces d'animaux et d'insectes du sommet de leur perfection jusqu'au plus bas reflux de la vie et qui, lorsqu'on arriverait au royaume végétal, pourrait à peine marquer la frontière où cesse l'animal et où commence la plante ».

La question de Herschel, c'est en substance celle de la nature des nébuleuses planétaires et du rayonnement émis par ces nébulosités. La conjecture qu'il propose à la fin de son article c'est celle de la « de la régénération d'étoiles au moyen de nébuleuses planétaires » ; une hypothèse qu'il appuie entre autres par la présence « d'un point brillant, bien défini ressemblant à une étoile » au centre de certains de ces objets : « Si le point est une étoile en formation, l'accumulation supplémentaire de la matière lumineuse déjà très condensée, pourrait finalement l'achever. »

Mais l'hypothèse de Herschel ne s'arrête pas là ; elle dessine toute une cosmogonie. Il explique la régénération des nébuleuses planétaires par l'accumulation par gravité de la matière lumineuse « perpétuellement émise par des millions de soleils ». Herschel s'interroge sur le devenir de ces particules lumineuses et recherche une cause « qui puisse les retenir de s'enfuir ou les réunir », cause qui n'est bien sûr rien d'autre que la gravité ; il s'inspire bien sûr là de Michell.

Ainsi les particules lumineuses émises par les étoiles innombrables, captées par les nébuleuses planétaires, seraient la source même de la matière composant les étoiles nouvelles en formation. Néanmoins, Herschel termine son article par une note prudente : « Toutefois, nous ne devons pas trop insister sur une conjecture de ce genre, car les moyens de la vérifier manquent. »

Les corps obscurs de Laplace

C'est là le chapitre le mieux connu de cette préhistoire des trous noirs, sans doute, tout simplement, parce qu'il a été redécouvert beaucoup plus tôt par la communauté relativiste que l'article de Michell. Ainsi a-t-il bénéficié d'une véritable publicité dans le monde relativiste des années 1970. Car le concept de « trou noir », encore difficile à comprendre pour beaucoup, fait alors l'objet de nombreux efforts d'explication, aussi bien en direction des relativistes de base, que du grand public.

C'est dans les premières éditions de *L'Exposition du système du monde* que Pierre Simon de Laplace expose ses idées sur ce sujet ; il publiera ses calculs un peu plus tard, dans les *Allgemeine geographische Ephemeri-*

LES EFFETS DE LA RELATIVITÉ

La relativité générale prédit clairement une action de la gravitation sur la lumière. Cette action s'exprime à travers des effets particuliers, essentiellement :

– La déviation de la lumière au voisinage d'une masse ; l'angle de déviation a été mesuré pour la première fois en 1919, lors de l'éclipse de Sobral, au Brésil.

– L'effet Einstein de décalage des raies d'émission d'un atome soumis à un champ de gravitation : des observations discutées ont été réalisées dès l'avènement de la relativité générale sur des raies solaires, puis, plus tard, sur des naines blanches. En 1960, l'expérience a été réalisée avec une bonne précision par Pound et Rebka, qui ont mesuré le décalage subi par la raie d'un atome soumis au champ de gravitation terrestre.

– Le délai temporel d'un écho radar a été mesuré pour la première fois sur Mercure, en 1967. Il mesure le décalage entre la prévision de la relativité restreinte (sans action de gravitation) et celle de la relativité générale quant au temps mis par un signal électromagnétique sur un aller et retour réalisé grâce à un écho sur la planète.

Ces effets sont de l'ordre de $2Gm/c^2$ et participent tous à la vérification – très satisfaisante aujourd'hui – de la théorie de la relativité générale. Bien que la théorie newtonienne prévoie certains de ces effets, elle n'en prévoit jamais la juste grandeur ; ainsi ne donne-t-elle que la moitié de la déviation de la lumière au bord du Soleil. De plus, elle ne prévoit aucune avance concernant le périhélie des planètes, pas plus les 43 secondes d'arc d'avance par siècle observées du périhélie de Mercure, que les 42 secondes d'arc par jour du fameux pulsar binaire (PSR 1913+16).

L'effet Einstein de décalage des raies d'émission d'un atome dans un champ de gravitation est sans doute l'effet de relativité générale le plus proche de l'effet Michell. Ainsi l'expérience de Michell est-elle conceptuellement envisageable aujourd'hui, car une déviation angulaire différentielle liée au décalage de fréquence entre les deux rayons parvenant sur un prisme pourrait être théoriquement décelée. Mais il est évidemment beaucoup plus simple – et infiniment plus précis – de comparer directement le spectre gravitationnellement décalé à un spectre témoin, comme cela est réalisé dans les observations désormais classiques.

De toute manière, l'interprétation d'une telle expérience serait aujourd'hui toute différente. Tandis que, dans le cadre de la théorie de Newton, Michell pense cette expérience en terme de freinage gravitationnel subi par le corpuscule lumineux issu de l'étoile centrale, dans le cadre de la relativité générale, elle est analysée comme un effet de décalage spectral subi dans le champ de gravitation.

den : « La preuve du théorème selon lequel la force attractive d'un corps pesant peut être assez grande pour que la lumière ne puisse s'en échapper ». Il n'est d'ailleurs pas certain qu'il s'agisse bien de ses propres idées, peu originales face aux travaux de Michell, dont il n'est pas impossible qu'il ait eu connaissance auparavant. Mais Laplace expose d'une manière rapide et simple les nouveaux résultats, cherchant à vulgariser son propos, tendant à convaincre un nouveau public qu'il veut frapper...

Ainsi, après avoir fait une allusion à la nova de Tycho-Brahé, Laplace s'intéresse à « ces corps devenus invisibles » et conclut qu'il « existe donc dans les espaces célestes, des corps obscurs aussi considérables, et peut-être en aussi grand nombre, que les étoiles ». Puis il poursuit, exprimant en deux phrases l'essentiel du phénomène, l'idée de « corps obscurs » et l'effet de freinage gravitationnel de Michell : « Un astre lumineux de même densité que la Terre, et dont le diamètre serait 250 fois plus grand que celui du Soleil, ne laisserait, en vertu de son attraction, parvenir aucun de ses rayons jusqu'à nous ; il est donc possible que les plus grands corps lumineux de l'Univers soient, par cela même, invisibles. Une étoile qui, sans être de cette grandeur, surpasserait considérablement le Soleil, affaiblirait sensiblement la vitesse de la lumière et augmenterait ainsi l'étendue de son aberration. »

Soldner et l'avenir de l'astronomie

Les articles de Laplace auront un retentissement tout aussi modeste que ceux de Michell, mais c'est à lui que l'on doit l'intérêt pour Johann Georg von Soldner qui publie coup sur coup deux articles concernant l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière dont le second sera utilisé par Lenard aux fins de discréditer les travaux d'Einstein. Dans l'autre article publié en 1800, Soldner s'interroge sur les conséquences que pourrait avoir l'effet Michell-Laplace sur l'aberration et... sur le développement de l'astronomie.

Ainsi calcule-t-il en particulier la variation de l'aberration dans le cas où la vitesse de la lumière d'une étoile serait réduite d'un, de deux, voire de trois dixièmes ; l'aberration étant proportionnelle à la vitesse de l'observateur et inversement proportionnelle à la vitesse de la lumière de chaque étoile, elle se trouverait être augmentée dans les mêmes proportions. On conçoit les difficultés inextricables auxquelles aurait été alors confrontée l'astronomie de position puisque pour obtenir la détermination précise de la position des étoiles « fixes », il aurait été nécessaire de connaître la masse de chaque étoile afin de déterminer la vitesse de sa lumière et d'en déduire précisément son aberration. Ce point n'échappe pas à l'excellent critique qu'est Soldner qui se demande ce qu'il adviendrait dans un tel cas de l'astronomie : « Ceci est, à dire vrai, une triste remarque pour les astronomes et quand elle devra se vérifier, ce dont je doute à peine, l'observation précise des étoiles fixes... sera plongée dans des difficultés sans fin. »

Ainsi Soldner, tout en s'inquiétant de la question de la constance de la vitesse de la lumière à l'émission, prenait très au sérieux le freinage gravitationnel de Michell/Laplace. Rien d'étonnant donc à ce que, suivant les traces de Cavendish, il s'attache à calculer la déviation d'un rayon lumineux. Ainsi justifie-t-il l'hypothèse de l'effet de la gravitation sur la propagation de la lumière : « Il faut espérer que personne ne trouvera d'objection à ce que je traite un rayon de lumière comme un corps pesant. Que les rayons de lumière possèdent toutes les propriétés de base de la matière, on le voit grâce au phénomène d'aberration qui n'est possible que parce que les rayons lumineux sont réellement matériels. Et, qui plus est, on ne peut penser une chose qui existerait et qui agirait sur nos sens que si elle a les propriétés de la matière. »

C'est là un texte qui laisse entendre certaines des questions qui agiteront bientôt la naissance de l'optique ondulatoire...

Ainsi l'article de Soldner de 1801, n'est-il pas le premier mais l'un des derniers jalons de l'histoire méconnue de l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière au XVIII[e] siècle.

En 1808, dans une revue américaine de Philadelphie consacrée aux mathé-

9. JOHANN GEORG VON SOLDNER (1776-1833).

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

matiques, *The Analyst*, Nathaniel Bowditch, traducteur américain de la *Mécanique céleste de Laplace*, posait aux lecteurs de la revue un problème qui s'inspirait en substance des résultats exposés par Laplace dans son *Système du monde*. C'est que le problème de la capture gravitationnelle de la lumière représente un de ces problème-frontières dont sont si friands les experts et les amateurs et qui permettent de s'entraîner à la pratique de la théorie. Cette marque d'intérêt pour l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière montre qu'il s'agissait d'une très bonne question, qui ne se laissera pas si facilement oublier.

Dans la seconde édition de son *Traité de mécanique*, publié en 1833, Poisson, l'un des opposants les plus véhéments à la théorie ondulatoire, on trouve un dernier exposé de l'effet de freinage gravitationnel de la lumière : « Un rayon lumineux lancé du Soleil ou d'une étoile doit éprouver dans sa vitesse, comme tout autre projectile, une diminution due à sa pesanteur vers cet astre, c'est-à-dire à l'attraction en raison inverse du carré des distances à son centre, que la masse du corps exerce sur chaque particule matérielle de la lumière ; mais cette diminution est une fraction très petite de la vitesse finale de la lumière. »

Poisson ne tire pas les conclusions extrêmes de Michell ou de Laplace concernant les « corps obscurs » ; il remarque simplement « que la vitesse de la lumière, pour être de 30 950 myriamètres par seconde à une grande distance du Soleil, a dû être plus grande d'un peu moins de deux millionièmes seulement, en partant de sa surface ».

Des corps obscurs aux trous noirs

Ce sujet connaîtra un silence de près d'un siècle, un silence qui coïncide précisément, nous l'avons souligné à plusieurs reprises, avec l'effacement de la théorie corpusculaire de la lumière. Dès 1907, la question de l'influence de la gravitation sur la propagation de la lumière est pour Einstein à l'ordre du jour sous la forme d'une déviation des rayons lumineux ou d'une modification de la fréquence de la lumière dans un champ de gravitation. Deux problèmes qui feront bientôt l'objet de deux des trois tests qui permettront de confirmer la théorie de la relativité générale.

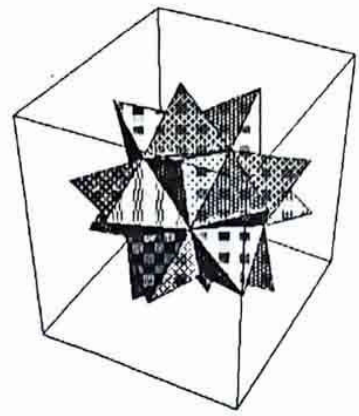
Il faudra attendre les années 1960 pour que l'idée de « corps obscurs » puisse trouver grâce, non sans mal, sous la forme de « trous noirs », parmi les relativistes ; pourtant, dès les années 1920, et indépendamment des études newtoniennes, des auteurs plus hardis que d'autres en feront, d'une manière plus ou moins précise, l'hypothèse. Mais ce serait peu de dire qu'ils n'ont pas été entendus. La première – et même la seconde – génération relativiste fera tout pour nier qu'il puisse se passer quelque chose sur « la singularité de Schwarzschild », le lieu qui, en relativité générale, correspond en substance au phénomène inventé par Michell. La résistance à l'idée de « trou noir » est un point essentiel de l'histoire de la relativité générale, d'autant plus étonnant que l'idée de « corps obscur » a été relativement bien acceptée dans le monde newtonien. Plusieurs raisons expliquent ce phénomène ; elles incluent des difficultés comme la vision topologique de la relativité générale ou celles qui concernent le problème de l'effondrement des étoiles. La problématique « externe » ne saurait être oubliée : la relativité générale, entre les deux guerres, aura bien du mal à trouver un second souffle, car une interprétation « néo-newtonienne » s'impose, une interprétation qui ne laisse pas s'exprimer l'essence profonde de la théorie. En fait, alors, le seul objet qui permet de penser les vrais concepts de la relativité générale, c'est l'Univers lui-même : la cosmologie restera longtemps le seul lieu où le caractère révolutionnaire de la théorie peut s'exprimer et être mieux compris. Car, personne n'aura, avant les années 1960, l'idée que l'espace peut être profondément déformé au voisinage d'une étoile très massive : l'idée de champ gravitationnel fort n'a pas encore émergé et la relativité générale n'a pas encore terminé sa révolution...

À l'inverse, le caractère spectaculaire de l'idée d'astre obscur permit à Michell et à Laplace de comprendre et de faire comprendre l'essence de l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière. Sans doute avait-on alors pleinement conscience de la force que pouvait donner à un argument une image aussi parlante que celle de « corps obscur ». Une force que les relativistes sauront utiliser à leur tour en mettant les « trous noirs » en orbite.

Réciproquement, l'histoire des « corps obscurs » a dû attendre, pour être redécouverte, que les « trous noirs » fussent bien acceptés par les relativistes : on ne comprend vraiment que ce que l'on a déjà quelque peu perçu... ■

MATHEMATICA ™

Wolfram Research, Inc.



Mathematica **est un Système puissant de Résolutions Mathématiques par l'ordinateur**

NUMERIQUES

Mathematica peut effectuer des calculs numériques de toutes précisions.

FORMULES

Mathematica peut résoudre des problèmes algébriques et de calculs, ainsi que des calculs rétroactifs dans les formules.

GRAPHIQUES

Mathematica peut générer des représentations graphiques PostScript 2D ou 3D en noir et blanc ou en couleur.

PROGRAMMATION INTERACTIVE

Mathematica est un langage de programmation symbolique puissant.

EDITEUR DE DOCUMENTS

Mathematica vous permet de créer des documents comprenant des textes, des graphiques, et des formules.

Mathematica pour Macintosh :

Pour le lancer il faut un minimum de 2,5 MO de mémoire. La version standard pour Macintosh Plus, SE, et II. La version avancée pour Macintosh II en couleur est avantagée par le coprocesseur 68881.

Version Mac standard : 6200 HT / Version Mac avancée : 9950 HT

Mathematica pour Système 386 MS-DOS :

√ Supporte CGA, EGA, VGA et Hercule standard.
√ Supporte PostScript, LaserJet, imprimantes Epson FX et Toshiba P3XX.
√ Commande-Ligne pour l'édition et le défilement retour.
√ Calculs supportés par la mémoire virtuelle.
√ Il est recommandé d'avoir 640 K de mémoire, 1 MO de mémoire étendue et 5 MO sur disque dur.

Version 386 standard : 8700 HT
Version 386/7 (il faut le coprocesseur 287 ou 387) : 12450 HT
Version 386/Weitek (il faut le coprocesseur Weitek) : 16200 HT

Mathematica est aussi disponible pour :

√ ***Apollo*** : DN 3000, 3500, 4000, 4500
√ ***Cray*** : Cray X-MP, Cray Y-MP, Cray 2
√ ***DEC*** : VAXstation, MicroVAX 2000, MicroVAX II, 730, 750, 78X, 82XX, 8300, 8350, MicroVAX 3500, 3600, 6210, 8530, 8550, 86XX, 8700, 8810, 8820, 8830, 8840, 8842, 8974, 6240, DECstation 3100
√ ***Hewlett-Packard*** : HP 9000/3XX, HP 9000/825, 835, HP 9000/840, 850, 855
√ ***IBM*** : AIX/RT
√ ***MIPS*** : RC 2030, RS 2030, M/120, M/1000, M/2000
√ ***Silicon Graphics*** : Personal Iris, Iris 4D/50 jusqu'à 4D/80GT, Iris 4D/120S jusqu'à 240GTX
√ ***Sony*** : NEWS 700, 800, 1700, 1800, NEWS 1900
√ ***Sun*** : Sun-3, Sun-4, Sun-386i

Tous les marques cités sont des marques déposées par leurs propriétaires respectifs.

POUR TOUS RENSEIGNEMENTS CONTACTER :

SOFTWORLD

17 Avenue Emile Zola, 75015 Paris.

Tél : (1) 40 59 02 99 Fax : (1) 45 79 95 55

La formation des synapses dans le cerveau

RONALD KALIL

Lorsque le cerveau d'un jeune animal se développe, les circuits neuronaux se modifient en fonction de l'environnement et de l'activité de l'animal ; de nouvelles connexions s'établissent.

Le cerveau des mammifères, bien plus complexe que tout autre système naturel ou artificiel, s'élabore à partir d'un groupe de cellules immatures et indifférenciées. Malgré la complexité du cerveau, les neurobiologistes ont découvert, au cours des 100 dernières années, comment les circuits électriques et chimiques d'échange de l'information s'établissent et se modifient *in utero*, puis après la naissance. La plupart des neurobiologistes admettaient que les gènes imposaient les connexions initiales entre les neurones (les cellules nerveuses), dans le circuit neuronal de base, mais on s'est longtemps demandé si toute la maturation cérébrale était commandée par les gènes : de nombreux chercheurs pensaient que l'activité cérébrale, avec notamment la propagation préférentielle des influx nerveux, ou potentiels d'action, dans certains neurones, ajustait le nombre, la répartition et l'efficacité des synapses, où les neurones se transmettent les informations.

Au cours des 25 dernières années, de nombreuses études ont montré qu'une activité anormale du cerveau, lors de son développement, peut engendrer l'établissement de circuits anormaux. On a récemment confirmé que l'activité cérébrale agit sur le développement des synapses, et l'on a découvert que les potentiels d'action sont essentiels au développement. Avec mes collègues des Universités de Madison et de Boulder, nous avons montré qu'en bloquant l'activité de jeunes neurones, on figeait leurs terminaisons axoniques dans un état immature : ces structures qui établissent normalement les synapses ne se développent pas, ne forment pas de nouvelles synapses et ne subissent pas diverses modifications importantes.

Une plasticité cérébrale indéfinie avantagerait peu un animal : quand les principales voies sensorielles sont établies, par exemple, elles doivent cesser de se modifier. De fait, certaines voies établies durant la gestation ne restent plastiques, après la naissance, que pendant une période limitée, lors de laquelle s'effectuent les ultimes ajustements des circuits neuronaux (ces périodes « critiques » varient selon les zones du cerveau). Quand les ajustements sont terminés, les voies neuronales perdent généralement leur capacité de se modifier, de sorte que le cerveau peut réagir de façon cohérente et précise aux divers stimuli (par exemple, une lumière vive).

En revanche, dans certaines parties du cerveau, une plasticité permanente est essentielle : si les circuits neuronaux assurant l'apprentissage perdaient la capacité de se reconfigurer, le cerveau ne pourrait pas stocker de nouvelles connaissances.

En étudiant comment la plasticité se maintient dans les centres de l'apprentissage, on découvre, à l'échelle moléculaire, comment l'activité cérébrale modifie le développement du cerveau. Pendant les périodes critiques, les jeunes neurones de certaines zones du cerveau auraient les mêmes caractéristiques moléculaires que celles des neurones appartenant aux centres de l'apprentissage ; le remaniement serait alors possible. Il semble en outre que les mêmes types de mécanismes ajustent l'intensité des synapses en fonction de l'activité cérébrale, programment les périodes critiques et préservent la plasticité des centres de l'apprentissage.

Les potentiels transmembranaires

Bien que les cerveaux des divers mammifères aient des tailles et des formes très différentes, leur anatomie générale est la même, et leur développement est analogue au cours de la croissance, puis de la maturation. Au début de la gestation, plusieurs cellules se regroupent et forment le tube neural, qui se différencie ensuite en couches et en noyaux ; ces structures acquerront ultérieurement des fonctions spécifiques.

Quand les cellules sont regroupées, elles se différencient et émettent des prolongements : un axone et de nombreuses dendrites. L'axone, dont la longueur atteint parfois plusieurs dizaines de centimètres, transmet des signaux ; les dendrites, généralement plus courtes, en reçoivent.

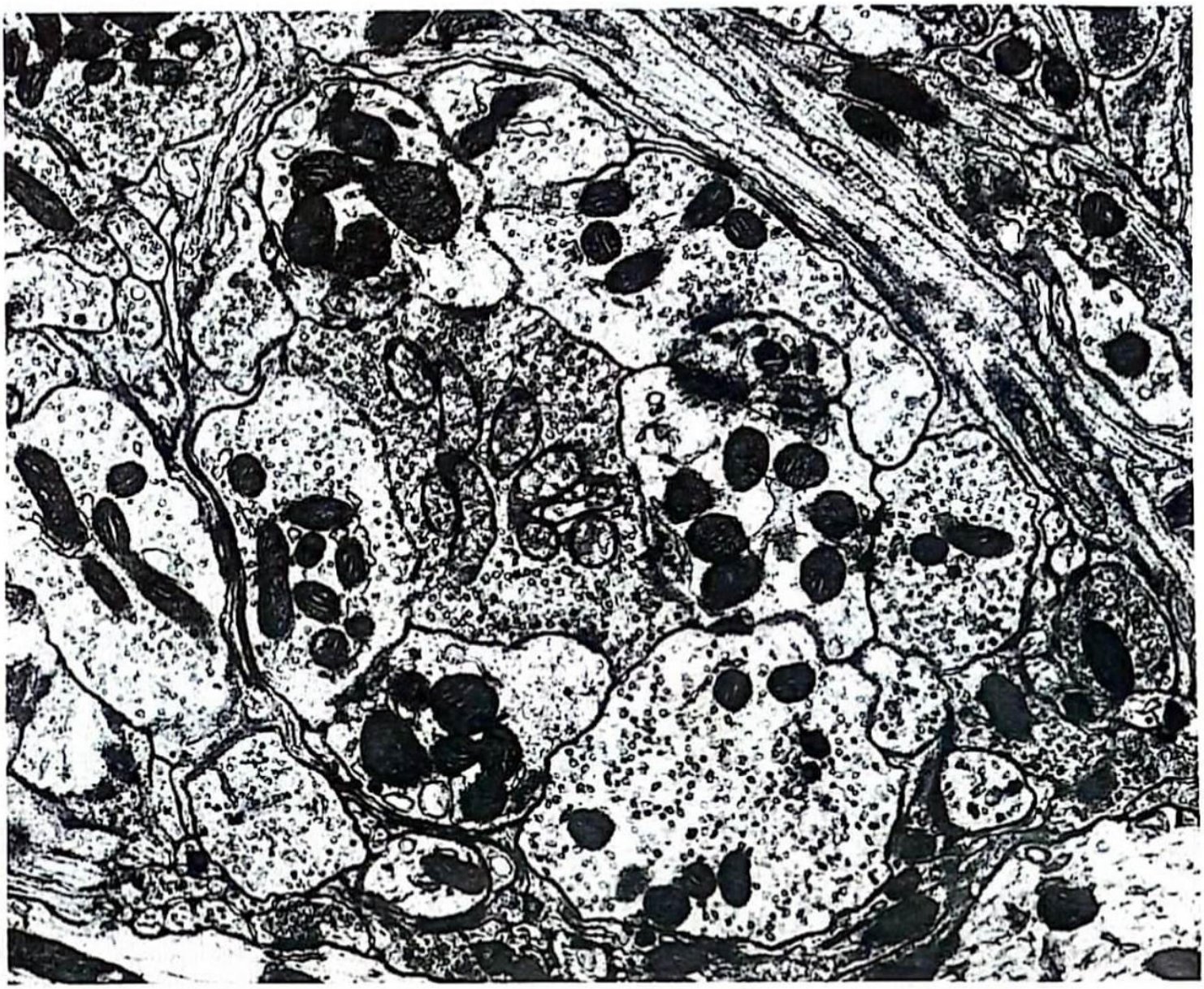
On suppose que les axones, lors de leur croissance, sont guidés par des variations de concentration en certains composés chimiques dont la libération serait déterminée génétiquement. Quand l'axone a atteint sa destination, il se ramifie, et des bulbes se forment à l'extrémité des branches ; ces « boutons » établissent des synapses avec les dendrites ou d'autres régions réceptrices des cellules cibles. La plupart des synapses sont ainsi constituées d'une terminaison axonique présynaptique, d'une région réceptrice située sur une dendrite postsynaptique et d'une fente étroite entre les deux ; un axone peut établir des synapses avec de nombreux neurones, et chaque neurone reçoit généralement des signaux de différents neurones.

Quand les synapses sont formées, des signaux sont transmis de neurone en neurone. Dans le cerveau des

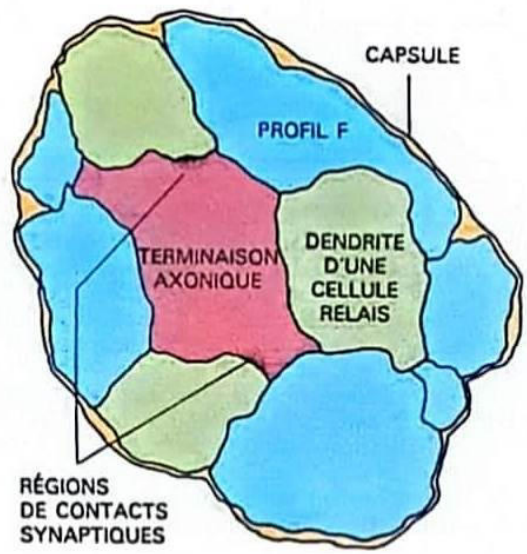
© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

mammifères, la plupart des transmissions résultent de l'échange de molécules : la terminaison présynaptique libère un « neuromédiateur », qui diffuse dans la fente synaptique et se lie aux molécules réceptrices disposées sur la membrane du neurone postsynaptique. Cette fixation déforme le récepteur et active ainsi des canaux qui règlent l'entrée ou la sortie d'ions spécifiques.

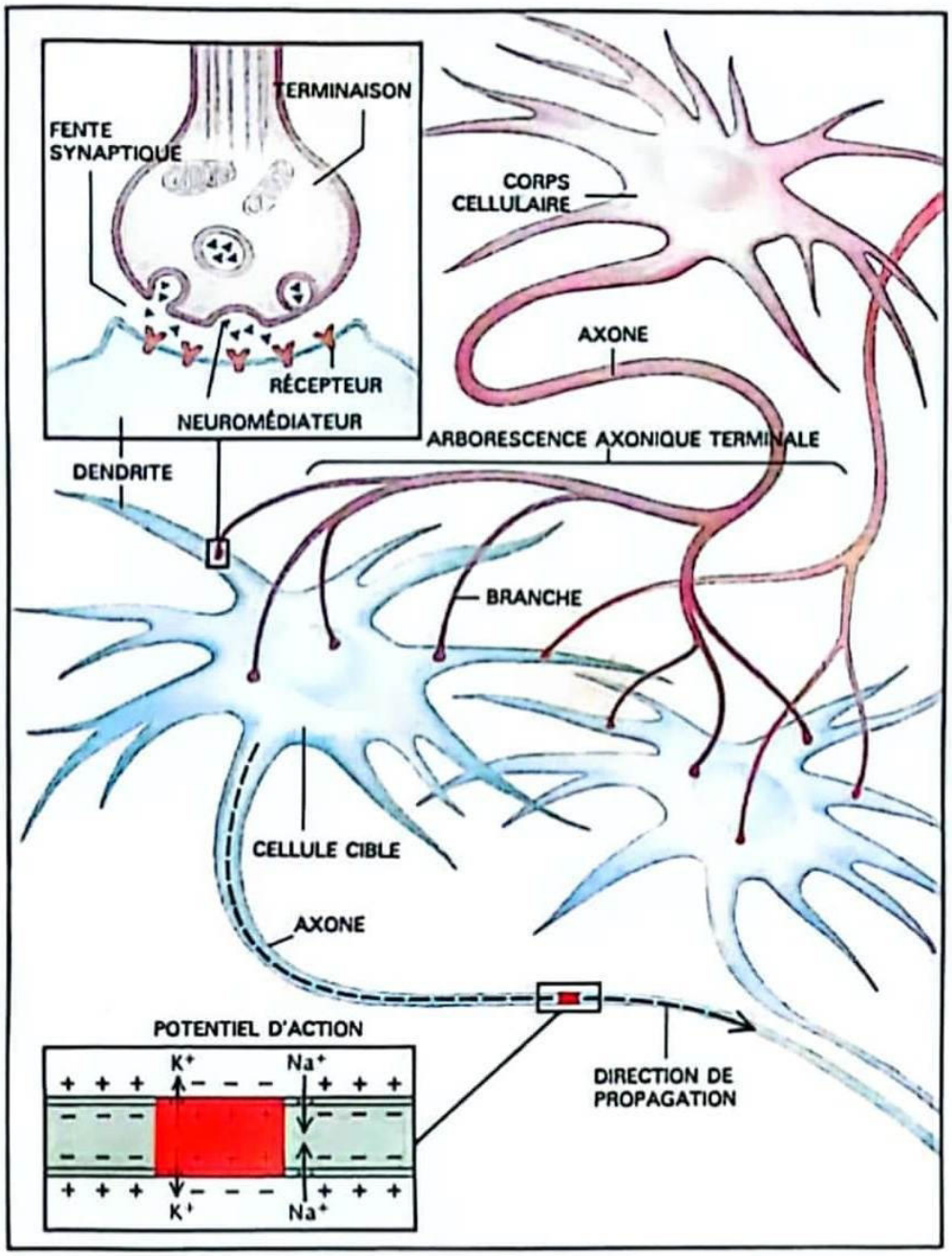
Ces échanges d'ions déterminent l'activité du neurone postsynaptique (qui peut simultanément recevoir de nombreux signaux) et commandent l'émission des potentiels d'action. Quand de nombreuses impulsions se propagent le long de l'axone, du corps cellulaire d'un neurone vers ses terminaisons, elles déclenchent la libération de neuromédiateur, qui agit sur d'autres neurones. Les potentiels d'action, qui durent moins d'un millième de seconde, sont des inversions transi-



1. DES ZONES SYNAPTIQUES COMPLEXES se forment dans des régions du cerveau appelées corps genouillés latéraux, au cours des huit premières semaines après la naissance d'un chat. Au centre, on voit la terminaison *(en violet sur le schéma ci-contre)* d'un axone (une longue extension par laquelle un neurone transmet des signaux vers d'autres neurones) issu d'une cellule ganglionnaire de la rétine. À la naissance, ces terminaisons en forme de bulbe mesurent environ la moitié de leur taille adulte et forment déjà quelques synapses (les sites de communication) avec les dendrites (des prolongements cellulaires assez courts) des cellules relais des corps genouillés latéraux *(en vert sur le schéma)*. Pendant les huit semaines qui suivent, les terminaisons axonales grossissent et établissent des synapses avec les profils *F (en bleu sur le schéma)*, les appendices spécialisés des dendrites issues des interneurones des corps genouillés latéraux. Les terminaisons et les dendrites qui les entourent sont dans une capsule *(en jaune sur le schéma)* qui délimite une zone synaptique complexe. L'auteur a découvert que ce développement anatomique, qui intervient normalement au cours des huit semaines qui suivent la naissance, n'a lieu que si les neurones émettent des impulsions nerveuses, ou potentiels d'action. Le grossissement de cette micrographie électronique est égal à 18 000.



toires et spontanées du potentiel transmembranaire, c'est-à-dire de la différence de potentiel électrique entre les deux faces de la membrane cellulaire. Dans les cellules au repos, le potentiel transmembranaire est égal à 70 millivolts, le potentiel intracellulaire étant inférieur au potentiel externe. Des potentiels d'action apparaissent quand le potentiel transmembranaire est réduit à 40 millivolts environ, par suite de l'accumulation d'ions positifs dans le corps cellulaire ou de l'évacuation d'ions négatifs dans le milieu extracellulaire. Quand ce seuil est atteint, la cellule « décharge » : la membrane cellulaire de la région où l'axone se rattache au corps cellulaire devient très perméable aux ions sodium, positifs ; le potentiel intracellulaire devient temporairement supérieur au potentiel extracellulaire, de sorte que les échanges d'ions s'inversent ; des ions positifs sont évacués, et le potentiel transmembranaire reprend presque immédiatement sa valeur de repos, alors que le potentiel d'action se propage dans l'axone.



2. LES SIGNAUX EXCITATEURS reçus par un neurone cible peuvent engendrer un potentiel d'action, c'est-à-dire une inversion momentanée et limitée de la différence de potentiel électrique entre les deux faces de la membrane cellulaire. Les potentiels d'action se propagent le long de l'axone *(flèche pointillée)*. Les signaux traversent généralement les synapses par un mécanisme chimique *(cartouche en haut à gauche)* : une terminaison axonale d'une cellule présynaptique libère un neuromédiateur, qui diffuse dans un espace étroit, la fente synaptique, et se lie à des molécules réceptrices de la cellule cible, postsynaptique. Cette liaison rend la membrane postsynaptique localement perméable à des ions spécifiques. Quand cette perméabilité permet à un nombre suffisant d'ions sodium d'entrer dans la cellule *(cartouche inférieur)*, un potentiel d'action apparaît *(dans la zone rouge)* : l'intérieur de la membrane cellulaire, dont le potentiel est normalement inférieur à celui de l'extérieur, devient temporairement supérieur ; des ions potassium (K^+) sont évacués et le potentiel reprend presque aussitôt sa valeur initiale.

Le rôle des potentiels d'action dans le développement cérébral est apparu dans les années 1960 et 1970, quand on a étudié le système visuel du Chat. Ce système est intéressant parce que sa maturation se poursuit pendant les deux premiers mois après la naissance de l'animal : on détermine assez facilement les dernières étapes du développement et l'on peut les perturber afin de comprendre le rôle de l'environnement et le fonctionnement du système visuel.

La ségrégation des axones

Le système visuel du Chat commence dans la rétine, avec les cellules ganglionnaires : ces cellules transmettent l'information reçue des cellules photoréceptrices vers les corps genouillés latéraux, situés dans une région du cerveau appelée thalamus. Chez le Chat comme chez de nombreux mammifères, les cellules ganglionnaires de la moitié droite de chaque œil (qui reçoivent des informations provenant de la partie gauche du champ visuel) ont leur axone qui aboutit dans le corps genouillé latéral de l'hémisphère cérébral droit. Inversement les cellules ganglionnaires de la partie gauche de chaque œil communiquent avec le corps genouillé latéral de l'hémisphère gauche. Dans les corps genouillés latéraux, des cellules relais transmettent ensuite l'information aux neurones du cortex visuel du même hémisphère.

Carla Shatz, David Sretavan et Marla Luskin, de Stanford, ont déterminé le développement prénatal de ces circuits neuronaux. Les axones embryonnaires des cellules ganglionnaires de la rétine atteignent normalement les corps genouillés latéraux vers le milieu de la gestation (celle-ci dure environ 63 jours chez le Chat). À ce stade, chaque corps genouillé latéral est un groupe de cellules disposées au hasard. Les corps genouillés latéraux se transforment considérablement au cours de la seconde moitié de la gestation : leurs cellules s'organisent en couches, alternativement sensibles aux signaux émis par l'un des deux yeux. Cette spécialisation des couches résulte d'une stratification progressive des axones qui proviennent des cellules ganglionnaires de la rétine : les extrémités des axones associés à l'œil droit se regroupent dans des couches spécifiques du corps genouillé latéral, et celles des axones associés à l'œil gauche se regroupent dans les couches adjacentes.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

Environ dix jours avant la naissance du chaton, les axones des cellules relais des corps genouillés latéraux atteignent le cortex visuel. Ces axones pénètrent surtout dans la quatrième des six couches initialement présentes. Au début, les axones correspondant à l'œil droit sont mélangés avec les axones recevant les signaux de l'œil gauche, et ils sont souvent en contact avec les mêmes cellules, de sorte que les cellules cibles peuvent être stimulées indifféremment par l'un ou l'autre des deux yeux.

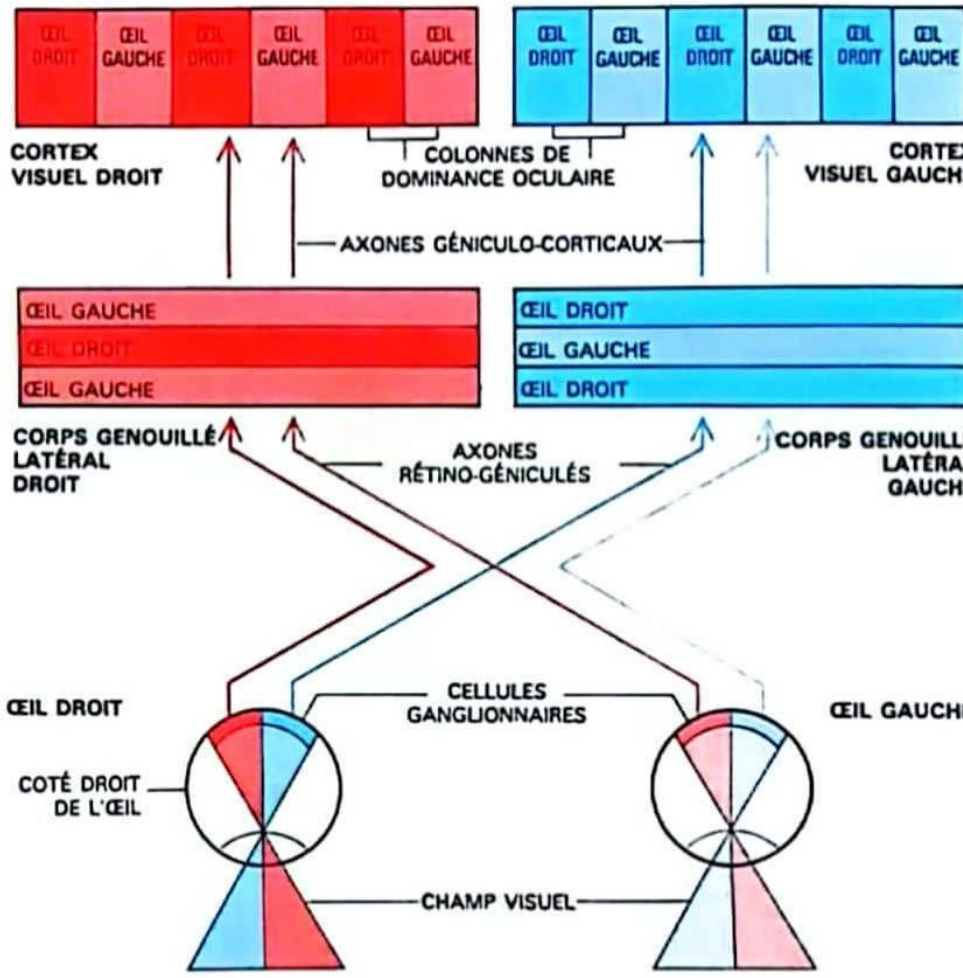
Cet état est transitoire : Simon LeVay, Michael Stryker et C. Shatz, à Harvard, ont montré qu'au cours du deuxième mois après la naissance, les axones géniculo-corticaux se regroupaient en fonction de l'œil auquel ils correspondent. Certaines de leurs extrémités se rétractent, de sorte que chaque cellule corticale ne reste en contact qu'avec les cellules du corps genouillé latéral associées soit à l'œil droit, soit à l'œil gauche. À la fin de cette ségrégation, le cortex contient des « colonnes de dominance oculaire », alternées et en nombre égal pour les deux yeux : certaines colonnes ne reçoivent que des signaux provenant de l'œil droit, et les colonnes adjacentes ne reçoivent que des signaux provenant de l'œil gauche.

Dans les années 1960, à Harvard, Torsten Wiesel et David Hubel ont montré que l'usage de la vue est indispensable au développement cérébral normal : ils suturaient une des deux paupières de chatons nouveaunés et observaient les conséquences de cette opération sur la vision des animaux adultes. On découvrit ainsi que les colonnes de dominance oculaire se formaient anormalement quand un œil était inactif ; en mesurant l'activité électrique de la quatrième couche du cortex visuel, après réouverture de l'œil, on observait que la quasi-totalité des cellules ne réagissaient qu'aux signaux de l'œil qui était resté ouvert.

Les anomalies corticales résultent surtout d'anomalies de croissance des axones issus des corps genouillés latéraux. En colorant ces axones, C. Shatz et M. Stryker observèrent que les axones géniculo-corticaux de chats élevés pendant plusieurs semaines avec un œil fermé ne se répartissaient pas normalement en domaines spécifiques d'un seul œil (D. Hubel, T. Wiesel et S. LeVay firent la même expérience avec des singes) ; au contraire, les axones associés à l'œil ouvert formaient de nouvelles arborescences et agrandissaient ainsi leur territoire cible, dans le cortex, au détriment des axones associés à l'œil suturé. Après avoir découvert qu'une activité neuronale anormale perturbait l'établissement du système visuel, on a cherché si l'activité neuronale était elle-même indispensable : si quelques synapses s'étaient formées même en l'absence de potentiels d'action, on aurait pu conclure que certains aspects du développement étaient d'origine génétique.

Comment pouvait-on éliminer les potentiels d'actions ? On imagina d'abord d'élever des chats dans l'obscurité totale, après la naissance ; la suture des deux yeux aurait été insuffisante, car de la lumière aurait pu pénétrer à travers les paupières (l'absence de stimulation visuelle ne semble pas perturber les chatons : ils restent vigoureux, joueurs et croissent normalement). On découvrit alors que le système visuel des animaux élevés dans l'obscurité se développait anormalement, mais que le développement n'était pas totalement inhibé. Contrairement aux colonnes de dominance oculaire des animaux normaux, celles des animaux élevés dans l'obscurité étaient mal définies et de taille irrégulière. Ainsi la ségrégation postnatale des axones associés à chacun des deux yeux avait commencé, mais ne s'était pas achevée.

Ce début de développement fit d'abord croire que la maturation avait lieu en partie, même en l'absence d'activité visuelle, mais d'autres travaux montrèrent que les potentiels d'action ne sont pas complètement supprimés quand on élève les animaux dans l'obscurité. William Burke et William Hayhow, de l'Université de Sydney, montrèrent qu'une absence totale de stimulation ne supprimait pas totalement l'activité des cellules



3. LES CIRCUITS NEURONAUX importants pour la vision du chat ressemblent à ceux d'autres mammifères dont les yeux sont à l'avant de la tête. Les cellules ganglionnaires de la moitié droite des deux rétines transmettent les informations au corps genouillé latéral de l'hémisphère cérébral droit ; les axones issus de l'œil droit aboutissent à des cellules localisées dans la couche médiane du corps genouillé latéral, tandis que les axones issus de l'œil gauche sont en contact avec des cellules situées au-dessus ou au-dessous de cette couche. De même, les axones des cellules ganglionnaires de la moitié gauche des deux rétines aboutissent dans le corps genouillé latéral gauche, et sont regroupés en fonction de l'œil auquel ils sont associés. Les cellules relais de chaque corps genouillé latéral transmettent ensuite les signaux visuels au cortex visuel du même hémisphère : les axones associés à l'œil droit se terminent dans des colonnes spécifiques de cellules corticales, et les axones associés à l'œil gauche se regroupent dans les colonnes adjacentes. Ces regroupements sont à l'origine des colonnes de dominance oculaire, dans le cortex.

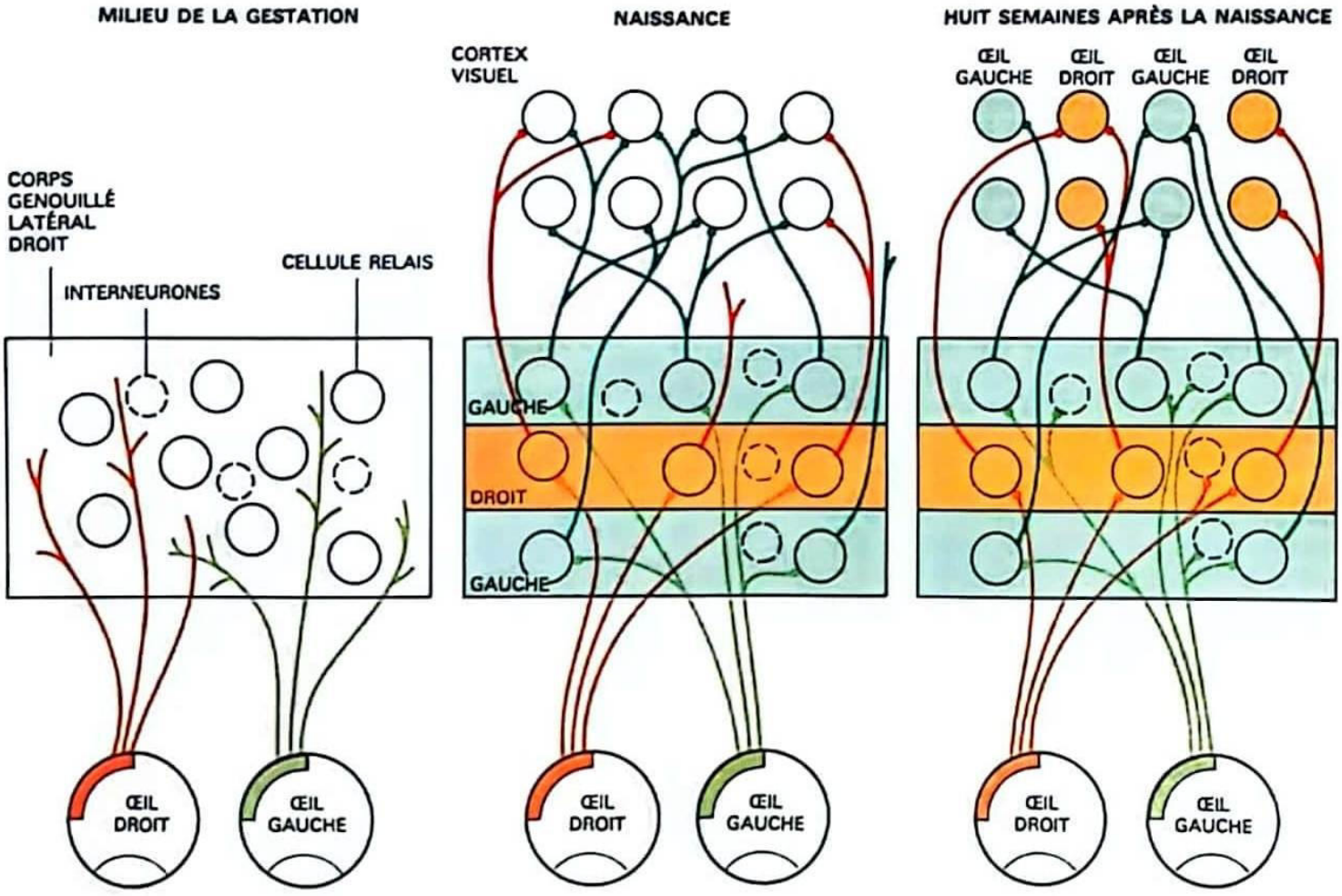
ganglionnaires de la rétine ; les cellules déchargent spontanément même quand aucune lumière ne parvient aux yeux. En outre, Robert Rodieck et P. Smith, à Sydney, et David Mastronarde, à Boulder, montrèrent que les cellules ganglionnaires d'un même œil déchargaient souvent spontanément, et presque simultanément, mais que l'activité des cellules ganglionnaires d'un œil était indépendante de celle de l'autre œil.

On a déduit de toutes ces observations que les décharges spontanées et corrélées des cellules ganglionnaires de chaque œil pouvaient stimuler le développement cortical. Notamment on a supposé que les activités spontanées des cellules ganglionnaires permettaient aux axones géniculo-corticaux d'élaborer des colonnes de dominance oculaire rudimentaires.

Puisque les cellules ganglionnaires déchargeaient spontanément, on ne pouvait étudier le rôle des potentiels d'action dans le développement synaptique qu'en bloquant ces décharges. Or la tétrodotoxine, une toxine naturelle extraite des ovaires du poisson lune japonais ou d'un triton californien, bloque la formation des potentiels d'action, sans détruire les tissus nerveux : elle bloque l'entrée des ions sodium dans la cellule en se liant aux canaux spécifiques de ces ions sodium, l'ouverture est commandée par le potentiel transmembranaire. Toutefois la tétrodotoxine tue la plupart des mammifères dès que sa concentration dans le sang est supérieure à quelques microgrammes par kilogramme de poids corporel et son emploi était difficile (la toxine bloque rapidement des fonctions vitales comme la respiration).

Il y a environ dix ans, on a eu l'idée d'injecter directement la toxine dans l'œil, afin qu'elle ne circule pas dans le sang : à raison d'une injection tous les deux ou trois jours, on empêche les cellules ganglionnaires de la rétine d'émettre des potentiels d'action.

Avec cette nouvelle méthode, M. Stryker, à l'Université de San Francisco, et William Harris, à l'Université de San Diego, traitèrent les deux yeux de chatons nouveau-nés jusqu'à ce que les animaux fussent âgés de six semaines : les colonnes de dominance oculaire ne se formèrent pas, et l'on conclut enfin que les potentiels d'action étaient donc indispensables à l'apparition des colonnes. En colorant les axones géniculo-corticaux associés à chaque œil, M. Stryker et W. Harris trouvèrent en outre que le développement cortical n'avait pas eu lieu parce que les axones géniculo-corticaux atteignant la quatrième couche du cortex visuel n'avaient pas formé de terminaisons réparties en zones spécifiques de chaque œil : des axones associés à l'œil gauche et des axones associés à l'œil droit établissaient souvent des contacts synapti-



4. LE SYSTÈME VISUEL du Chat se développe jusqu'au deuxième mois après la naissance. Les axones issus des cellules ganglionnaires de la rétine atteignent les corps genouillés latéraux vers le milieu de la gestation. Initialement les axones, trop immatures, sont disposés au hasard dans les corps genouillés et ne forment pas de synapses avec leurs cellules. À la naissance, les cellules des corps genouillés latéraux se sont regroupées en couches, et les terminaisons des axones sont rassemblées de telle façon que chaque couche des corps genouillés ne reçoit de signaux que de l'œil droit *(en orange clair)* ou de l'œil gauche *(en vert clair)* ; les axones rétino-géniculés ont commencé à établir des synapses avec les cellules relais, mais les synapses avec les interneurones ne sont pas encore formées. Les axones issus de nombreuses cellules relais ont établi des synapses avec les cellules du cortex visuel, et ces axones se recouvrent : ceux qui transmettent l'information issue de l'œil droit *(en orange foncé)* aboutissent souvent aux mêmes cellules que des axones associés à l'œil gauche *(en vert foncé)*. Vers la fin de la huitième semaine de la vie, les axones rétino-géniculés ont établi des synapses avec les cellules relais et avec les interneurones ; les axones géniculo-corticaux se sont regroupés en fonction de l'œil auquel ils sont associés, et des colonnes de dominance oculaire sont présentes.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

ques avec les mêmes cellules ; une fois la toxine éliminée, la plupart des cellules corticales réagissaient presque de la même façon aux signaux reçus par les deux yeux. Ces réactions étaient caractéristiques du cortex visuel des chatons nouveau-nés, mais pas d'animaux âgés de six semaines.

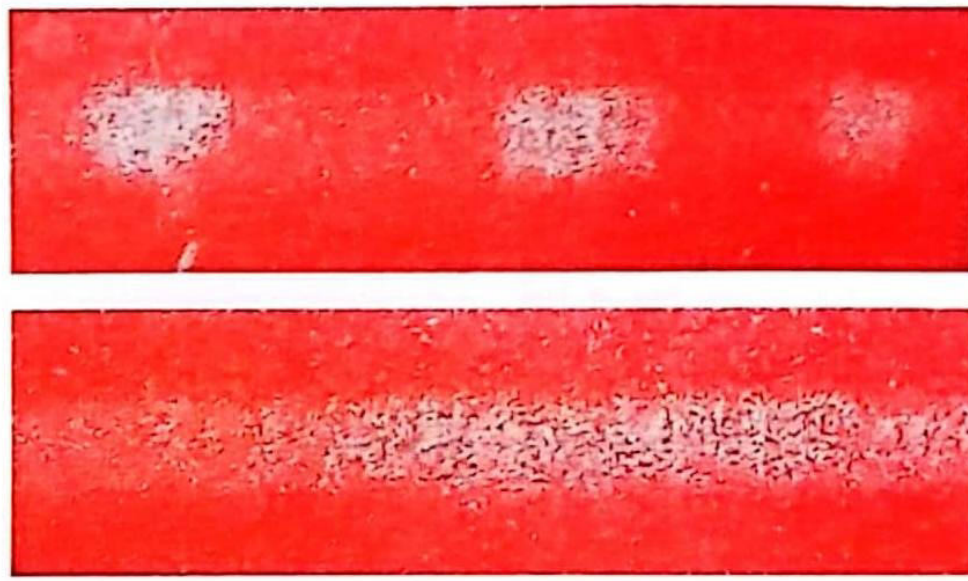
Simultanément Mark Dubin, Louisa Stark et Steven Archer, de l'Université de Boulder, examinèrent les conséquences neurophysiologiques de l'inhibition des cellules ganglionnaires sur les corps genouillés latéraux. Ils injectèrent de la tétrodotoxine dans un des deux yeux de chatons pendant les deux mois qui suivirent leur naissance, et ils enregistrèrent l'activité électrique des cellules des corps genouillés latéraux quelques jours après l'évacuation de la toxine. Ces enregistrements montrèrent qu'en bloquant l'activité des cellules ganglionnaires, pendant cette période critique, on perturbait l'évolution des corps genouillés latéraux. Vers la fin du deuxième mois de la vie, les neurones des corps genouillés sont normalement regroupés en couches spécifiques de chaque œil, et ils ont acquis une autre spécialisation : certains n'émettent un potentiel d'action que lorsqu'une tache lumineuse atteint le centre de leur champ récepteur, tandis que d'autres ne déchargent que lorsque cette stimulation cesse (le champ récepteur d'une cellule est la partie de champ visuel qui stimule la cellule). Cette spécialisation résulte de la ségrégation des axones rétino-géniculés : les axones des cellules ganglionnaires sensibles à l'apparition de la lumière et ceux des cellules ganglionnaires sensibles à la disparition de la lumière n'aboutissent pas aux mêmes cellules du corps genouillé latéral. Au contraire, dans les corps genouillés des animaux traités, la plupart des neurones associés à l'œil traité étaient excités aussi bien par l'apparition que par la disparition de la lumière ; ils ne distinguaient pas les deux états.

Les modifications anatomiques

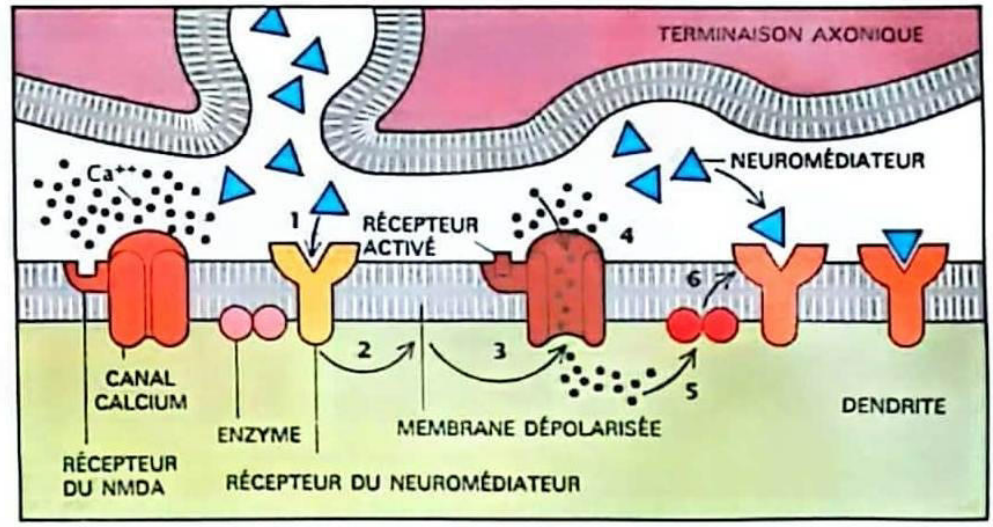
Grâce aux expériences réalisées avec la tétrodotoxine, on comprit qu'en abolissant les potentiels d'action dans le système visuel, on perturbait le développement synaptique : dans le cortex, les axones ne se regroupent pas en domaines spécifiques de chaque œil, et dans les corps genouillés, la ségrégation des axones sensibles à la lumière n'a pas lieu normalement. Quelle était l'origine de ces modifications structurelles ? Le blocage des celulles ganglionnaires perturbait-il le développement anatomique de leurs boutons présynaptiques ?

Avec M. Dubin, L. Stark et Grayson Scott, nous avons utilisé la microscopie électronique pour étudier l'évolution des synapses au cours du développement du cerveau ; nous nous sommes servis de travaux antérieurs où nous avions observé le développement normal des synapses dans les corps genouillés latéraux. Ces premières recherches avaient montré que, normalement, les boutons terminaux des cellules ganglionnaires se modifiaient beaucoup, au cours des deux mois qui suivaient la naissance des chatons : leur section double et le diamètre des zones qui établissent des contacts synaptiques diminue d'un tiers (ce rétrécissement assure une libération plus précise des neuromédiateurs).

Nous avions également observé que, dès la troisième semaine après la naissance, le nombre de contacts entre les boutons présynaptiques et les den-



5. LE CORTEX VISUEL d'un chaton normal, âgé de huit semaines, est très différent de celui d'un chaton du même âge, dont un œil est inactif depuis la naissance. Chez le chat normal *(en haut)*, les colonnes de dominance oculaire apparaissent sous la forme de taches alternées blanches et roses (les taches blanches ont fixé un marqueur radioactif, qui est remonté dans le cortex après avoir été injecté dans un œil). Au contraire, le cortex de chats ayant une vision monoculaire est uniformément blanc *(en bas)* : la région est uniformément sensible aux signaux émis par l'œil qui n'a pas été traité. Manifestement les colonnes de dominance oculaire ne se forment que si les deux yeux sont stimulés pendant le développement du système visuel.



6. LES MÉCANISMES par lesquels les molécules appelées récepteurs du NMDA assurent la potentialisation associative à long terme (une modification durable de la force des connexions synaptiques) dans l'hippocampe cérébral ont été partiellement élucidés. Quand les signaux émis par une cellule présynaptique sont émis de façon appropriée *(1)*, ils dépolarisent suffisamment la membrane cellulaire *(2)* pour activer les récepteurs du NMDA, et ouvrir les canaux calciques *(3)*. Les ions calcium entrent dans la cellule *(4)* et activent notamment les enzymes *(5)* qui, en réorganisant les protéines membranaires, renforcent la synapse *(6)*. Au cours du développement, l'activation systématique d'un neurone par un autre pourrait renforcer les synapses par un mécanisme analogue à celui décrit ci-dessus.

drites des corps genouillés latéraux augmentait ; les contacts déjà établis avec les dendrites des cellules relais étaient préservés, et de nouveaux contacts s'établissaient avec des appendices spécialisés (les profils *F*) des dendrites appartenant aux cellules appelées interneurones. Les interneurones, qui émettaient des signaux inhibiteurs vers les corps genouillés latéraux, ajustaient précisément les réactions des cellules relais.

Un autre changement survient généralement vers la fin du deuxième mois de la vie des chats : environ 30 pour cent des terminaisons rétino-géniculées sont alors situées dans les « zones synaptiques complexes », qui sont formées d'un bouton présynaptique entouré d'un groupe de dendrites et de profils *F*. Chaque zone synaptique complexe est entourée de prolongements cytoplasmiques issus des cellules gliales, qui confèrent notamment sa structure au cerveau. Bien que l'on ne comprenne pas parfaitement la fonction des zones complexes, on pense qu'elles isolent les synapses des influences extérieures.

Chez des chats dont un œil était traité par la tétrodotoxine pendant huit semaines après la naissance, les connexions synaptiques établies par les cellules ganglionnaires de l'œil traité restaient identiques à celles de chatons nouveau-nés : le développement avait été totalement interrompu. En l'absence de potentiels d'action, les terminaisons ne grossissaient plus, leur région de contact ne rétrécissait plus, et elles n'établissaient plus de contacts synaptiques avec les profils *F*. La quasi-totalité de synapses étaient établies avec des cellules relais, et les zones synaptiques complexes étaient quasi absentes.

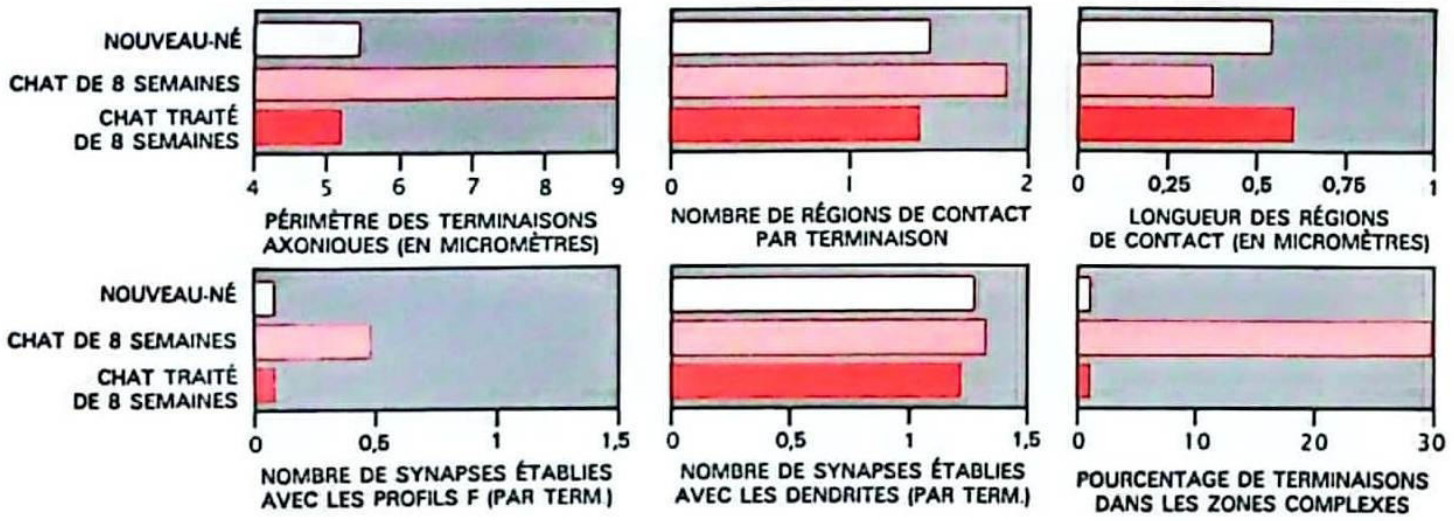
Deux mois critiques

Ces études démontraient que la suppression des potentiels d'action arrêtait la maturation des terminaisons axonales dans les cellules ganglionnaires, mais elles ne prouvaient pas que le blocage du développement était définitif ; le développement axonal reprendrait-il si l'activité neuronale était rétablie ? Le développement serait-il normal si on laissait fonctionner le système visuel pendant quelque temps avant de bloquer les potentiels d'action. Nous avons étudié ces deux questions en réalisant deux types d'expériences.

Tout d'abord, nous avons bloqué l'activité des cellules ganglionnaires d'un seul œil pendant quatre ou pendant dix semaines après la naissance ; puis nous avons cessé d'administrer la toxine afin de laisser le système visuel fonctionner normalement pendant plusieurs mois. Si les connexions rétino-géniculées s'étaient développées normalement malgré le retard de l'activité neuronale, nous aurions déduit que les potentiels d'action, indispensables au développement, n'étaient pas nécessairement programmés pour des périodes particulières.

Inversement, dans nos secondes expériences, nous laissions le système visuel des animaux fonctionner normalement jusqu'à la troisième ou la cinquième semaine après la naissance, puis nous commencions les injections de tétrodotoxine. Si les connexions rétino-géniculées s'étaient formées normalement, nous aurions conclu que les potentiels d'action déclenchaient seulement le développement, mais qu'ils n'étaient pas indispensables par la suite. En fait, les connexions rétino-géniculées ne se sont développées dans aucun des cas ; le développement n'avait lieu, en partie, que lorsque l'on interrompait assez tôt (quatre semaines après la naissance) l'administration de la toxine : la taille des terminaisons axonales et le nombre de synapses qu'elles établissaient était proche de la normale (75 pour cent), mais les zones synaptiques complexes étaient très rares.

La deuxième série d'expériences démontrait que l'expérience visuelle précoce (avant le blocage rétinien) ne suffisait pas à amorcer le développement synaptique. Même quand les potentiels d'action sont normaux pendant le premier mois après la naissance, les connexions rétino-géniculées restent quasiment les mêmes qu'à la naissance : les potentiels d'action sont indispensables pendant les deux premiers mois de la vie (et surtout pendant le deuxième mois) à la maturation des terminaisons des cellules ganglionnaires et à l'établissement de nouvelles synapses. Quand les potentiels d'action sont bloqués, au cours de cette période, le développement est anormal. Le mécanisme de ce développement reste inconnu : on ignore comment les transferts d'informations entre les neurones déclen-



7. CES GRAPHES résument les résultats des expériences qui ont montré que les cellules ganglionnaires de la rétine doivent émettre des potentiels d'action pour que leurs terminaisons axonales se développent normalement. On a observé au microscope électronique des coupes de corps genouillé latéral de chats nouveau-nés, de chats normaux âgés de huit semaines et de chats « traités », âgés de huit semaines, dont on avait inactivé les cellules ganglionnaires d'un œil, dès la naissance. Ces images montrent que les terminaisons axonales des cellules ganglionnaires inactivées, chez les chats traités, sont quasi identiques à celles des chats nouveau-nés : les terminaisons sont moins grosses que chez les chats normaux âgés de huit semaines, les synapses sont beaucoup moins nombreuses, et les régions de contact qui libèrent les neuromédiateurs sont plus longues ; chez les chats traités et les chatons nouveau-nés, les axones n'établissent que très peu de synapses avec les profils *F*, et les terminaisons axonales n'aboutissent presque jamais dans des zones synaptiques complexes, tandis qu'environ 30 pour cent y aboutissent, chez les chats normaux.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

chent la maturation des terminaisons axonales, et modifient la répartition et l'intensité des synapses.

Les études théoriques et expérimentales de l'apprentissage pourraient cependant résoudre le problème de l'intensité des couplages synaptiques. Les études de l'apprentissage résolvent les mystères du développement, car l'apprentissage et le développement résultent tous deux de l'établissement et du renforcement de connexions synaptiques, au détriment d'autres synapses, qui sont affaiblies ou éliminées. En 1949, à l'Université MacGill, Donald Hebb a proposé un mécanisme par lequel l'activité neuronale modifierait les connexions synaptiques : quand un neurone stimule fréquemment ou constamment un autre neurone, des modifications métaboliques ou structurales de l'une des deux cellules – ou des deux – renforceraient la connexion entre elles (des activités simultanées épisodiques ou aléatoires ne renforceraient pas les synapses).

Les leçons de l'apprentissage

L'hypothèse de D. Hebb était invérifiable à cette époque, mais des études moléculaires récentes de la « potentiallsation associative à long terme » ont montré comment une intense activité synaptique renforçait les synapses. Ce phénomène de potentialisation a été découvert par Terje Lomo, à Oslo, en 1966 ; il correspond à une augmentation du couplage synaptique qui dure plusieurs jours, voire toute la vie, et qui résulte de stimulations appropriées. Chez les mammifères, la potentialisation associative à long terme se manifeste surtout dans l'hippocampe, une partie du cerveau qui joue un rôle fondamental dans l'apprentissage et la mémoire (Voir *Mémorisation et neurones*, par Daniel Alkon, *Pour la Science*, n° 143, septembre 1989).

En excitant un neurone de l'hippocampe avec des stimulations spécifiques – des courants électriques de haute fréquence appliqués pendant quelques secondes –, on renforce durablement ses synapses. Pendant plusieurs années, on n'a pas compris pourquoi cette stimulation particulière engendrait une potentialisation associative à long terme, mais on a finalement observé que le récepteur du NMDA (N-méthyl-D-aspartate) est spécifiquement activé par cette stimulation. Ce récepteur commande l'ouverture et la fermeture du canal par lequel les ions calcium (des messagers intracellulaires omniprésents) pénètrent dans les cellules ; *in vitro*, on peut ouvrir ce canal, sensible aux variations de potentiel électrique, en l'exposant à du NMDA : on pense que le NMDA se fixe au récepteur, d'où le nom donné à ce dernier.

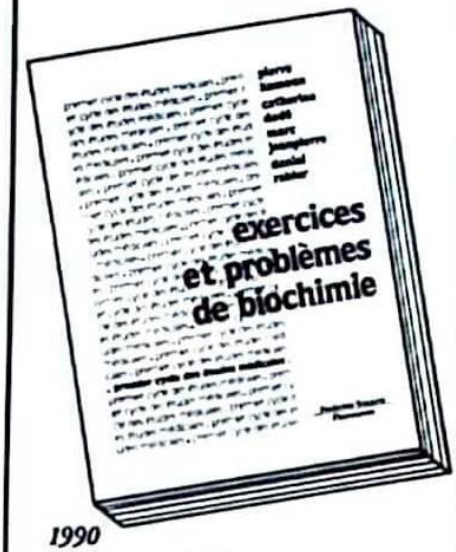
Quand on stimule brièvement une cellule postsynaptique de l'hippocampe par un courant électrique de haute fréquence, des ions positivement chargés pénètrent dans la cellule et abaissent le potentiel intracellulaire au-dessous d'un seuil ; les récepteurs du NMDA sont activés, et les canaux calcium s'ouvrent. Les ions calcium entrent dans la cellule, où ils activent des enzymes intracellulaires, notamment celles qui reçoivent des signaux synaptiques, dans les membranes postsynaptiques. On ignore quels événements s'ensuivent, mais les enzymes réorganisent peut-être les protéines membranaires, augmentant les réactions des neurones postsynaptiques aux stimulations appliquées.

Il est tentant de supposer qu'un mécanisme analogue renforce également les synapses, lors du développement cérébral. L'activation répétée des cellules corticales par les axones géniculo-corticaux associés à un œil serait détectée par un récepteur sensible au potentiel, comme celui du NMDA ; la détection d'une modification déclencherait, par l'intermédiaire des ions calcium, la réorganisation de la membrane postsynaptique, qui renforcerait, puis stabiliserait les synapses actives.

Ce mécanisme est séduisant, car il expliquerait comment seraient commandés le début et la fin des périodes critiques de développement des divers systèmes cérébraux : la machinerie biochimique de certains groupes de neurones serait génétiquement programmée pour synthétiser ou cesser de synthétiser des molécules qui, comme le récepteur du NMDA, seraient sensibles à des stimulations spécifiques. Cette description est plausible, car le début et la fin de la période d'activité pourraient être facilement codés dans les gènes.

En outre, ce modèle serait compatible avec la plasticité prolongée d'autres parties du cerveau : il suffirait que les neurones de ces zones fussent programmés pour produire indéfiniment les récepteurs du NMDA ou d'autres molécules analogues, au lieu de cesser leur production à un moment donné. Des modifications d'un même mécanisme biochimique expliqueraient aussi bien les brèves périodes de plasticité, associées aux activités cérébrales, que la plasticité durable que l'on observe dans d'autres parties du cerveau, notamment dans l'hippocampe. ■

80 PROBLÈMES DE BIOCHIMIE MÉDICALE AVEC LEURS CORRIGÉS



1990
Collection « PCEM »
208 pages
200 FF

A partir des articles scientifiques les plus récents :
• Un ouvrage didactique qui fournira aux étudiants une évaluation précise de leurs connaissances.
• Une classification en quatre chapitres : Peptides et protéines - Enzymologie - Acides nucléiques - Métabolisme.
• Un plan calqué sur l'organisation des cours reçus en faculté.

Médecine-Sciences
Flammarion

Cet ouvrage est disponible chez votre libraire spécialisé ou par correspondance

BON DE COMMANDE

Nom _____

Prénom _____

Adresse _____

_____

Désire recevoir « Exercices et Problèmes de Biochimie » au prix de 200 F + 25 F de frais de port, soit 225 F
Règlement par chèque bancaire à l'ordre de : Librairie Flammarion-4 - Département VPC - 26, rue Jacob, 75006 Paris

La matière divisée : les petits agrégats

MICHAEL DUNCAN ■ DENNIS ROUVRAY

Les petits agrégats de quelques centaines d'atomes au plus constituent un état particulier de la matière. Leur réactivité et leur sélectivité chimiques en font des intermédiaires utiles en catalyse, en optique ou en électronique.

Un solide que l'on divise de plus en plus finement perd successivement ses propriétés de solide, à la manière du chat du Cheshire dans *Alice au pays des merveilles*. Le corps qui se forme ne possède ni les propriétés d'un liquide ni celles d'un gaz ; il est dans un nouvel état de la matière : celui d'agrégat.

Avec un nombre d'atomes compris entre deux et quelques centaines, les agrégats permettent d'explorer les fondements de la physique des solides, de la chimie et de la science des matériaux. Au-dessous de quelle taille un agrégat perd-il les propriétés du solide auquel il correspond ? Comment les atomes se réorganisent-ils quand ils ne sont plus entourés de matière ? Quand la substance initiale est métallique, au-dessous de quelle taille les agrégats ne possèdent-ils plus les propriétés dues aux électrons libres, telle que la conductibilité ? Quand on fait croître un agrégat, en lui ajoutant progressivement des atomes, sa structure se modifie-t-elle progressivement ou, au contraire, par étapes brusques ?

La plupart des propriétés spécifiques aux agrégats dérivent du fait que la majorité de leurs atomes sont en surface : un agrégat compact de 20 atomes comporte 19 atomes en surface ; un agrégat d'une centaine d'atomes peut en comporter jusqu'à 80. D'autres propriétés des agrégats résultent de l'insaturation de leurs liaisons électroniques ; la forte réactivité chimique qui en résulte fait des agrégats des outils très efficaces pour l'étude de l'état solide et pour la chimie industrielle : on pourrait les utiliser pour faire croître des cristaux, pour fabriquer des catalyseurs chimiques sélectifs et pour fabriquer des matériaux nouveaux, aux propriétés électroniques, magnétiques et optiques « sur mesure ». Les matériaux ainsi créés pourraient alors améliorer les performances de produits aussi divers que les lasers, les films photographiques, les phosphores électrosensibles, les disques magnétiques ou les superordinateurs.

La synthèse des agrégats

On devina l'importance potentielle des agrégats bien avant qu'on ne les produisît en laboratoire : en 1661, le chimiste irlandais Robert Boyle imagina, dans son ouvrage *Sceptical Chymist*, l'existence de « masses minuscules, ou agrégats, qu'on ne décompose pas facilement en particules constitutives ». L'étude des agrégats fut cependant freinée par leur taille microscopique et leur forte réactivité chimique : c'est seulement vers 1950 que l'on parvint à les synthétiser en laboratoire avec les techniques modernes de la chimie des surfaces.

Lors des premières synthèses, on vaporisait un métal dans un four, puis on faisait précipiter la vapeur sur un substrat. On réalisa d'abord des agrégats de métaux alcalins, comme le sodium ou le potassium, à des températures de l'ordre de 250 °C ; puis on examina des métaux plus réfractaires. Néanmoins on parvenait difficilement à déterminer la limite à partir de laquelle apparaissaient les propriétés d'un solide.

En 1981, les équipes de Richard Smalley, de l'Université Rice, et de Vladimir Bondybey, des Laboratoires *ATT Bell*, inventèrent une méthode de synthèse des agrégats plus efficace : la vaporisation par laser. L'un de nous (M. Duncan) préparait alors sa thèse dans le groupe de R. Smalley ; il fut l'un des premiers à étudier des agrégats produits par cette méthode. La vaporisation par laser est aujourd'hui considérablement améliorée, et l'on sait fabriquer des agrégats qui comportent plus de 100 atomes, à partir de presque n'importe quel élément pouvant former un solide ; on a même réalisé des agrégats composés de plusieurs éléments, les agrégats mixtes.

Pour former des agrégats *(voir la figure 3)*, le faisceau d'un laser fonctionnant en impulsions est focalisé sur un cylindre ou un disque de métal, placé dans un canal. Les atomes du métal se vaporisent en un plasma très chaud, qui se mélange à un jet d'hélium : celui-ci refroidit et condense la vapeur, formant des agrégats de diverses tailles, qu'il entraîne vers une chambre à vide. Dans cette chambre, la différence de pression provoque une détente supersonique du jet : les agrégats sont ainsi refroidis – et stabilisés – jusqu'à une température proche du zéro absolu.

Les agrégats sont triés en fonction de leur taille grâce à un dispositif placé à l'opposé de la chambre de vaporisation. Le centre du jet traverse une ouverture, puis est irradié par un laser ultraviolet qui arrache des électrons aux agrégats. Les agrégats positivement chargés passent enfin dans un champ électrique qui les accélère. Comme la vitesse acquise après accélération est inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse des agrégats, on sépare le jet en groupes homogènes après un temps de vol

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

libre : les amas les plus légers (ceux qui comportent le moins d'atomes) arrivent les premiers, avant les amas les plus lourds.

On obtient des informations sur la structure des agrégats en examinant la distribution de leurs tailles dans le jet analysé. Les tailles les plus fréquentes semblent associées à des configurations particulièrement stables ; quand on trace le spectre de masse, c'est-à-dire le nombre d'ions agrégats formés en fonction du nombre d'atomes les constituant, on obtient des pics de différentes hauteurs *(voir la figure 4)*. Le nombre d'atomes associés aux pics les plus intenses est qualifié de « magique », par analogie avec le modèle quantique des noyaux, où seules certaines combinaisons de protons et de neutrons sont stables.

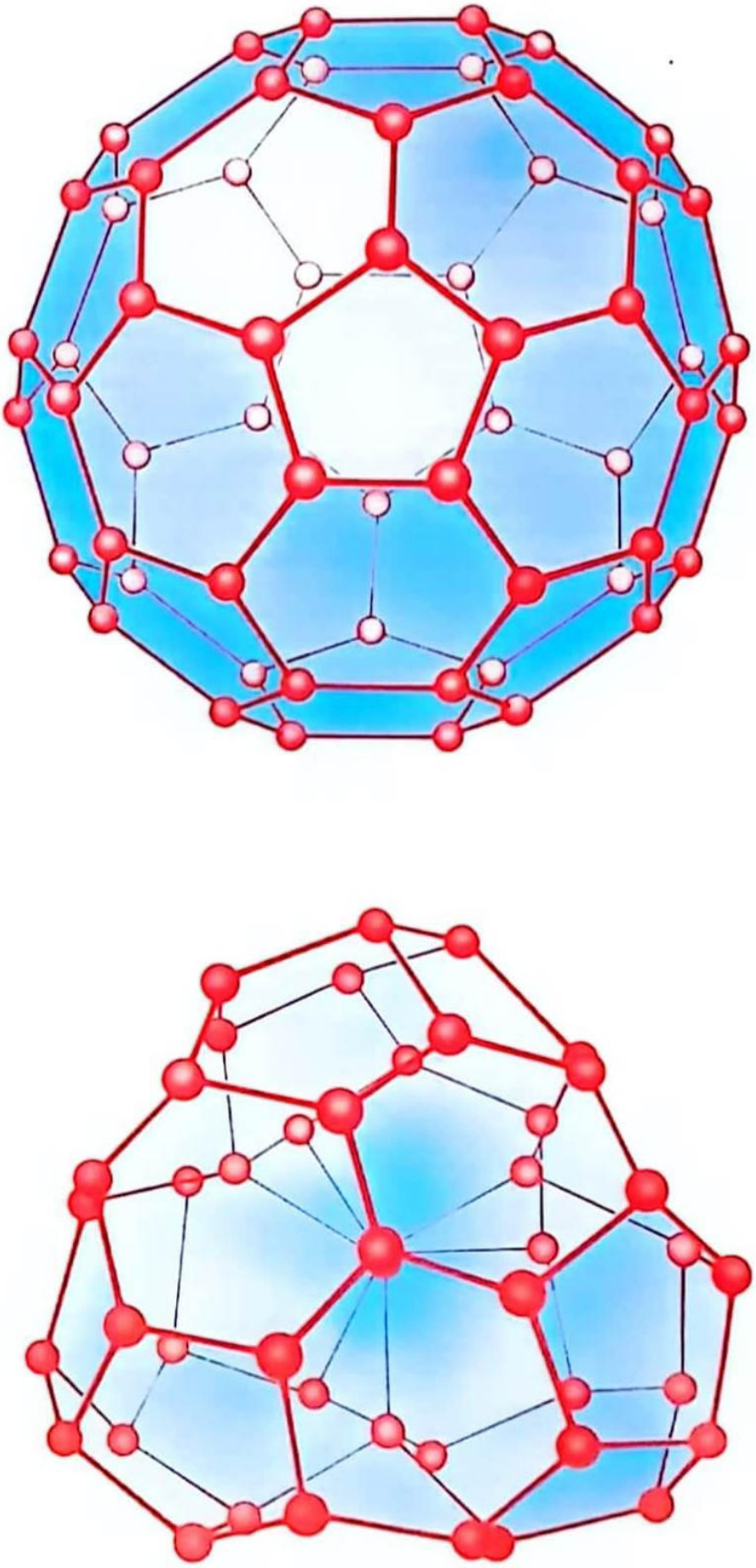
Les nombres magiques

Les nombres magiques révèlent parfois la forme des agrégats. Dans le cas du plomb, par exemple, le spectre de masse montre que les agrégats de sept et de dix atomes sont deux fois plus fréquents que les agrégats de tailles voisines. On peut penser que chacune des deux formes stables est un motif élémentaire à partir duquel se constitue le plomb solide. La structure de l'agrégat de dix atomes est l'élément clé de la structure cristalline du diamant, où chaque atome est symétriquement lié à quatre autres atomes dans un réseau ouvert. Les agrégats à sept atomes semblent former des bipyramides à base pentagonale, avec cinq atomes dans un plan, et les deux derniers atomes placés symétriquement de part et d'autre de ce plan. Ces deux configurations constituent les blocs élémentaires du réseau cubique compact, que possèdent le plomb solide et bien d'autres cristaux.

En outre, six atomes s'ajoutent facilement à une bipyramide à base pentagonale pour former un icosaèdre, la structure compacte la plus stable. Les agrégats icosaédriques à 13 atomes diffèrent peu des motifs icosaédriques que l'on observe dans les solides compacts.

L'intérêt des spectres de masse apparaît quand on étudie les agrégats de 14 atomes de plomb, trois fois moins abondants que les agrégats de tailles voisines. Cette rareté résulte de la stabilité des icosaèdres à 13 atomes : on calcule qu'un groupe de 14 atomes formera plutôt un agrégat de 13 atomes, avec un atome faiblement lié ; il sera moins stable.

À l'Université de Géorgie, nous avons utilisé des nombres magiques



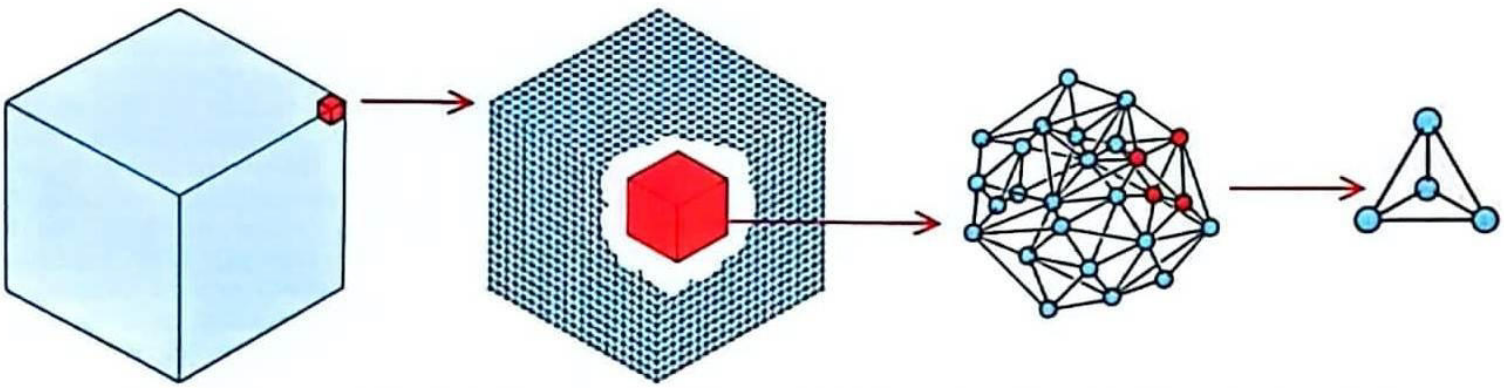
1. LES STRUCTURES qui pourraient être celles d'agrégats de 60 atomes de carbone *(en haut)* et de 45 atomes de silicium *(en bas)* sont théoriquement stables, mais on ne les a pas encore observées. La structure supérieure, en forme de ballon de football, a été suggérée pour les agrégats de 60 atomes de carbone, une espèce que l'on trouve dans les suies et peut-être dans les poussières interstellaires ; elle a été appelée « buckminsterfullérène », en hommage à Buckminster Fuller qui breveta le dôme géodésique. La structure inférieure, récemment proposée pour les agrégats à 45 atomes de silicium, est formée des mêmes polygones que le buckminsterfullérène.

afin de décrire les agrégats constitués de plusieurs éléments qui forment des alliages à l'état solide. Nous avons découvert que dans les agrégats mixtes de plomb et d'antimoine, les proportions des deux éléments diffèrent de celles qui sont observées dans l'alliage. Dans le spectre de masse, deux pics indiquent la prédominance d'ions formés de deux atomes de plomb et de trois atomes d'antimoine, et d'ions formés de quatre atomes de plomb et de cinq atomes d'antimoine. Or les chimistes avaient déjà observé de tels types d'ions dans une classe de molécules stables appelées ions de Zintl, dont ils avaient analysé la structure par cristallographie aux rayons X. Nos agrégats semblaient présenter le même type de stabilité que les ions de Zintl. Nous avons donc supposé que leurs structures étaient identiques : c'était soit une bipyramide à base triangulaire, pour les agrégats à cinq atomes, soit un antiprisme carré (un polyèdre à 12 faces triangulaires et une face carrée), dans le cas de l'agrégat à neuf atomes.

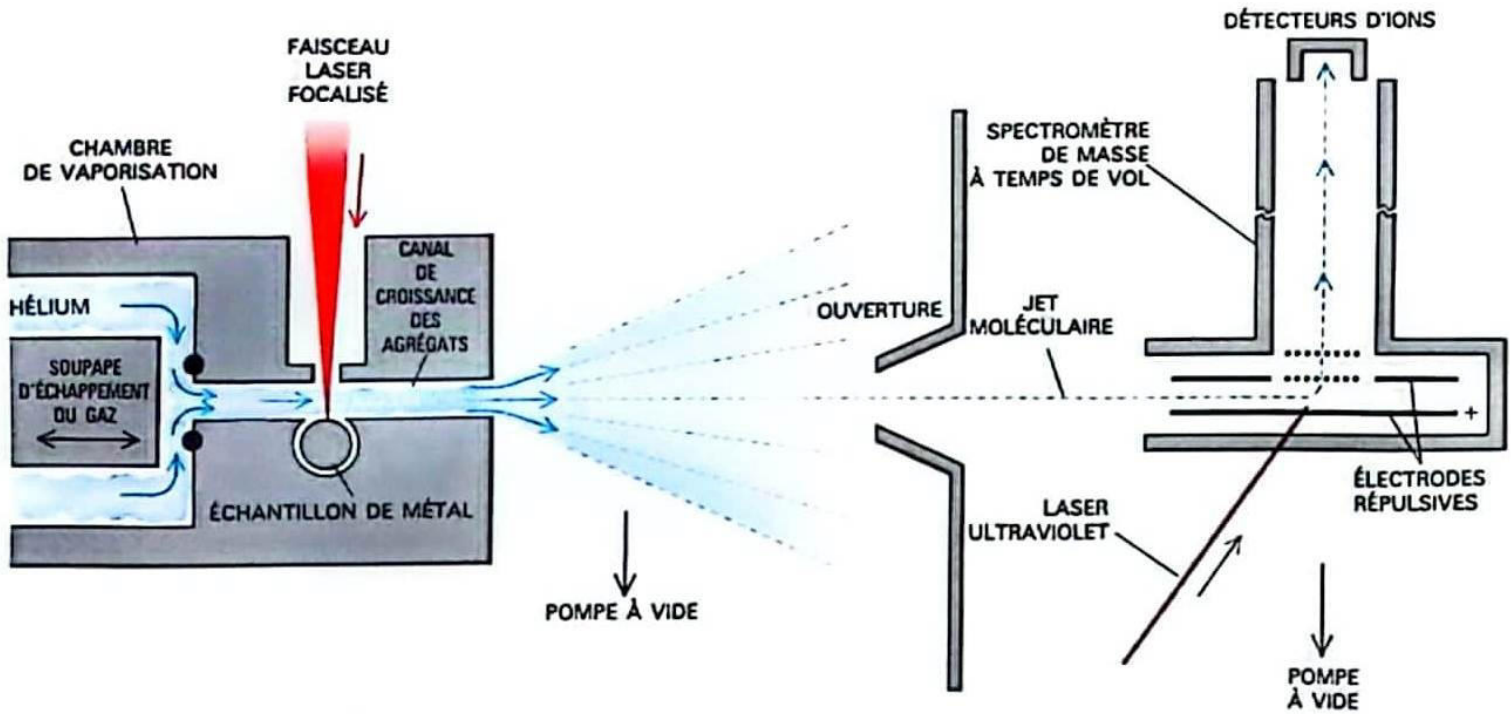
Les deux structures proposées pour les agrégats de carbone et de silicium sont d'une grande beauté mathématique. Bien que ces deux structures soient théoriquement très stables, ce qui explique leur inertie chimique, on n'a pas encore démontré leur existence. Les agrégats de carbone comporteraient 60 atomes répartis aux sommets d'hexagones et de pentagones, formant une cage analogue à un ballon de football. R. Smalley a nommé « buckminsterfullérène » cette structure, en hommage à Buckminster Fuller, qui déposa un brevet concernant le dôme géodésique en 1954 ; il pense que le buckminsterfullérène est présent dans les suies et dans la poussière interstellaire, où il serait responsable de l'absorption de certains rayonnements ultraviolets. R. Smalley a récemment proposé une structure encore plus complexe, composée des mêmes hexagones et des mêmes pentagones que le buckminsterfullérène, pour les agrégats de 45 atomes de silicium.

Agrégats solides ou labiles

Il semble légitime de supposer que les caractéristiques des solides sont présentes, en germe, dans les agrégats. Cependant cette hypothèse n'est vérifiée que lorsque la structure des agrégats est voisine de celle que l'on trouve dans les solides correspondants ; dans les autres cas, les analyses



2. LA TRANSITION entre le solide et l'agrégat est mal définie : les diverses propriétés comme la température de fusion, l'énergie d'ionisation ou la structure géométrique passent de celles du solide à celles de l'agrégat à des tailles différentes.



3. ON FORME DES AGRÉGATS avec un laser à impulsions qui vaporise un échantillon de métal situé dans un canal et balayé par un jet d'hélium gazeux ; ce jet refroidit et condense la vapeur en agrégats de tailles variées dans une chambre où l'on a fait le vide. Les agrégats sont ionisés par un laser ultraviolet, puis accélérés par un champ électrique : dans le spectromètre de masse, ils se regroupent selon leur masse. Un détecteur d'ions détermine l'abondance des agrégats ; les plus abondants sont les plus stables.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

ne confirment pas l'intuition. Étudions le cas des agrégats qui possèdent des formes isomères, c'est-à-dire des configurations moléculaires différentes pour une même composition chimique. Chaque isomère est relativement stable parce que son énergie représente un minimum local : il revient à sa configuration initiale quand on la déforme légèrement ; en revanche, il se transforme en une forme isomérique différente quand on lui fournit suffisamment d'énergie, par chauffage, par exemple. Ainsi les trimères de sodium sont des exemples d'agrégats « labiles » : les trois atomes forment un triangle isocèle dont la base évolue continuellement d'un côté à un autre, même à des températures très proches du zéro absolu. Comme la forme microscopique de tels agrégats n'est pas fixe, les agrégats labiles ressemblent plus à des gouttelettes liquides qu'à des particules solides..., pour autant que ces notions gardent un sens à cette échelle.

On compare également les agrégats aux solides sur la base des configurations électroniques. Les configurations électroniques déterminent directement l'abondance relative des divers agrégats, car elles en conditionnent la stabilité. Ces configurations varient selon les orbitales dont proviennent les électrons de liaison, et selon les degrés de liberté de ces électrons. Quand les électrons sont « délocalisés » sur tout l'agrégat – quand la charge négative est uniformément répartie – l'agrégat présente parfois certaines propriétés du métal solide, comme la conductibilité. Au contraire, quand les électrons sont très liés aux atomes, l'agrégat ressemble souvent à une molécule.

Certains électrons sont délocalisés dans les agrégats de métaux alcalins, comme le sodium ou le potassium, et de métaux précieux, comme le cuivre ou l'argent. Ces atomes n'ont qu'un seul électron dans leur dernière orbitale *s*. Quand le nombre d'atomes de l'agrégat augmente, les orbitales atomiques se combinent et forment des orbitales moléculaires ; puis ces dernières se transforment en bandes d'énergie, semblables à celles des solides. Pour ces métaux, le spectre de masse des agrégats présente des nombres magiques bien décrits par le modèle quantique de la goutte métallique à symétrie sphérique, dont les électrons sont délocalisés.

Walter Knight, Marvin Cohen et leurs collaborateurs de l'Université de Berkeley ont découvert que les agrégats de sodium les plus abondants sont ceux qui ont 8, 20, 40, 58 ou 92 atomes. Ces nombres correspondent aux couches complètes d'un gaz d'électrons dans un puits de potentiel à symétrie sphérique : ils prouvent que la délocalisation des électrons, dans ces agrégats, ressemble à celle des solides correspondants. Notons cependant que le modèle quantique qui prédit ces pics ne s'applique pas à l'état solide, car celui-ci ne présente pas de symétrie sphérique.

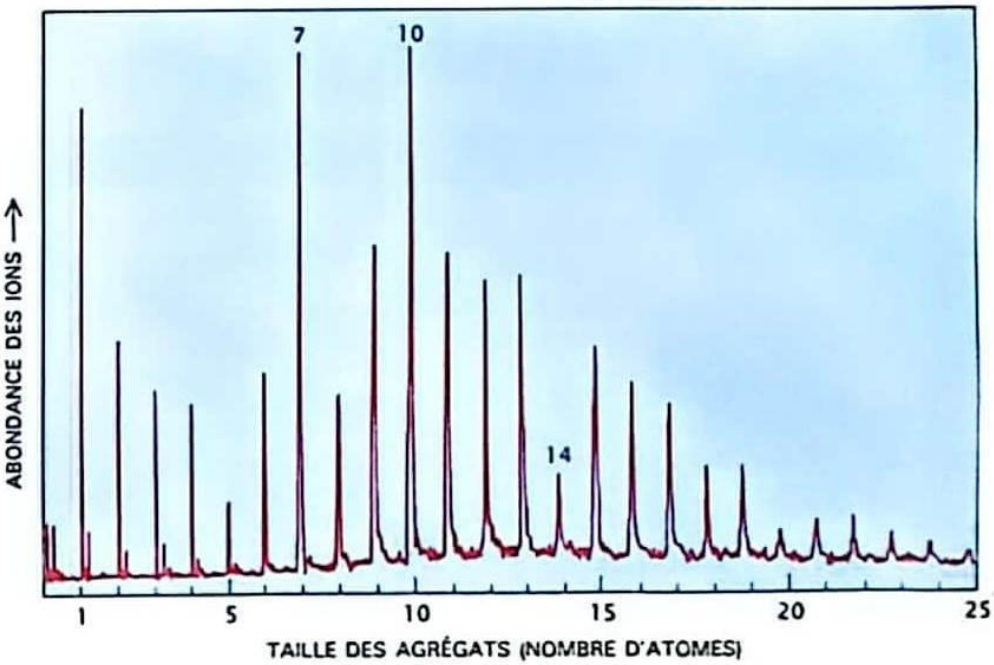
Les liaisons électroniques semblent plus localisées dans les agrégats de métaux comme le plomb et l'antimoine. Les électrons externes de ces éléments occupent des orbitales *p* et sont plus proches du noyau ; comme seuls ces électrons *p* participent aux liaisons électroniques, celles-ci sont plus confinées que dans les métaux alcalins ou précieux. Les métaux du groupe du plomb sont moins réactifs, de sorte qu'ils forment parfois des agrégats isolés quand on les dissout dans des liquides : comme des ions de Zintl, ils sont très stables parce que leurs orbitales électroniques sont pleines ; on a montré que les liaisons *p* étaient majoritaires dans les ions de Zintl à l'état gazeux et à l'état d'agrégats. Les orbitales *d* semblent intervenir dans les métaux de transition comme le fer, le chrome et le nickel, mais la description des agrégats est complexe pour ces éléments.

Les potentiels d'ionisation

On étudie la configuration électronique des agrégats en recherchant la quantité d'énergie nécessaire à l'expulsion d'un de leurs électrons. Cette énergie d'ionisation diffère selon que l'on considère des molécules ou des solides : un atome isolé de métal retient deux fois plus ses propres électrons que le solide correspondant ne retient ses électrons délocalisés. Si les agrégats se comportaient comme des solides très divisés, leur énergie d'ionisation devrait diminuer linéairement en fonction de leur taille.

Andrew Kaldor et ses collègues de la Société *Exxon* déterminèrent l'énergie d'ionisation des agrégats de fer et de niobium. Ils irradièrent les agrégats avec un laser ultraviolet accordable, à partir d'une faible énergie, et ils augmentèrent progressivement l'énergie jusqu'à ce que les premiers agrégats ionisés apparussent : l'énergie d'ionisation diminue effectivement à mesure que la taille de l'agrégat augmente. Cependant la diminution n'est pas régulière ; certains agrégats se comportent davantage comme des molécules que comme des solides divisés. Ces résultats et ceux d'autres chercheurs qui ont étudié des métaux différents ont montré que l'énergie d'ionisation d'agrégats comportant moins de 100 atomes diffère de celle du solide du même élément. La transition entre l'état d'agrégat et l'état solide s'effectue pour des nombres d'atomes supérieurs.

D'autres propriétés des solides semblent également apparaître à partir de nombres supérieurs d'atomes, mais on a rarement déterminé les points de transition entre les deux états. Des



4. CE SPECTRE DE MASSE des agrégats de plomb comporte deux grands pics correspondant aux agrégats de 7 et de 10 atomes et un petit pic correspondant aux agrégats de 14 atomes. Ces nombres sont appelés « nombres magiques » d'atomes, par analogie avec le modèle quantique du noyau.

agrégats d'or déposés sur un autre solide ne fondent à la température de fusion de l'or solide que s'ils comportent plus de 1000 atomes (on ignore cependant comment la température de fusion varie selon la nature du support).

Par diffraction des rayons X, on a observé que la distance interatomique moyenne est bien inférieure dans les dimères d'atomes de cuivre que dans le cuivre solide ; cette distance ne devient égale à celle du solide que pour les agrégats de plus de 50 atomes. Cependant, malgré cette différence notable, des agrégats qui ne comportent que 14 atomes de cuivre présentent déjà le réseau cubique compact caractéristique du cuivre solide.

Pour les agrégats de cuivre, d'aluminium ou de silicium, les énergies des orbitales (que l'on mesure en arrachant les électrons à l'aide de rayonnements d'énergie connue) diffèrent de celles des solides même quand les agrégats comportent 40 atomes. On ignore encore les énergies des agrégats plus gros, notamment parce qu'il est difficile de produire des faisceaux contenant beaucoup de gros agrégats.

L'examen de ces divers résultats indique que les différentes propriétés physiques des solides apparaissent pour des agrégats de tailles différentes : l'état solide ne surgit pas brusquement.

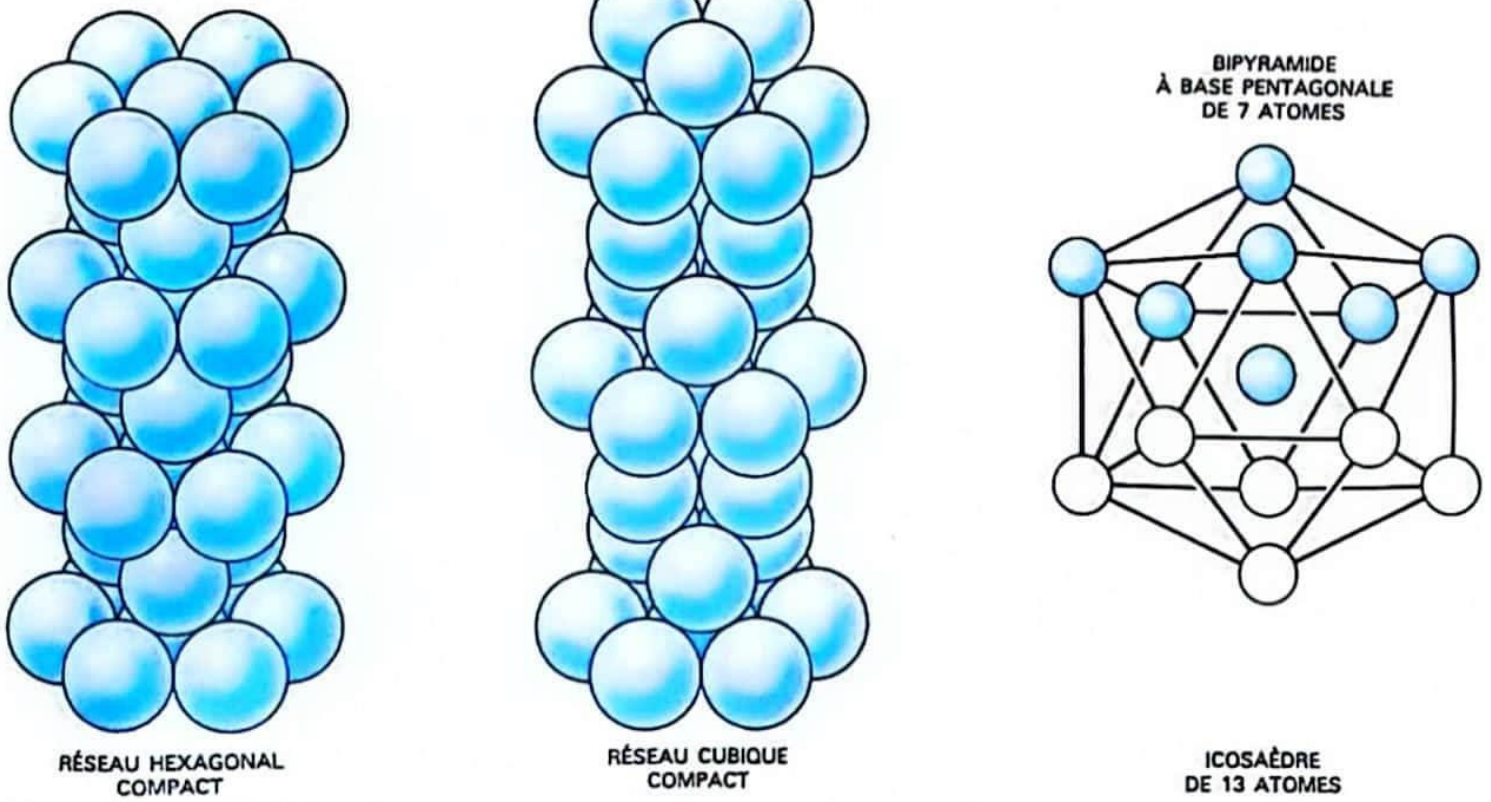
La catalyse par agrégats

Comment peut-on exploiter les propriétés chimiques de surface des agrégats ? Une application prometteuse est la catalyse, fondamentale en pétrochimie (quand on dissocie les fractions lourdes de pétrole en molécules plus légères, qui forment l'essence), dans la lutte contre la pollution (quand on oxyde ou quand on réduit les émissions nocives) et en synthèse chimique. Un catalyseur facilite une réaction chimique parce qu'il adsorbe les réactifs à sa surface ; les réactifs migrent ensuite vers des « sites actifs », où des liaisons chimiques sont rompues et d'autres sont reformées ; puis les produits sont désorbés et le catalyseur intervient dans une nouvelle réaction. Par exemple, un catalyseur qui adsorbe du monoxyde de carbone (toxique) et de l'oxyde d'azote (polluant) peut favoriser la formation de dioxyde de carbone et d'azote. Un catalyseur est efficace s'il adsorbe fortement les réactifs, et s'il désorbe facilement les produits finaux (voir *Les catalyseurs bimétalliques*, par John Sinfelt, *Pour la Science* n° 97, novembre 1985) ; il n'agit toutefois que si ses sites actifs sont nombreux et vraiment actifs ; dans la plupart des réactions catalytiques, la structure de ces sites est un mystère qui tourmente les chimistes.

On espère mieux comprendre les phénomènes de la catalyse en étudiant les agrégats, parce que leur forte réactivité leur permet d'adsorber les réactifs, et que leur petite taille limite le nombre de configurations géométriques du site d'adsorption. Cette dernière caractéristique devrait leur conférer une grande sélectivité, très recherchée par les industriels, car de nombreux catalyseurs accélèrent des réactions indésirables aussi efficacement que les réactions désirées.

Les pionniers de la catalyse par des agrégats furent, au début des années 1980, les groupes de R. Smalley, de A. Kaldor et de Stephen Riley, du Laboratoire américain d'Argonne ; ces études furent poursuivies dans plusieurs autres centres de recherche.

Dans l'espoir de trouver des catalyseurs « sur mesure », on a d'abord étudié des systèmes simples et, notamment, des agrégats de fer, de cobalt, de niobium ou d'aluminium, qui adsorbent fortement l'hydrogène gazeux. Dans de nombreux cas, certaines tailles d'agrégats étaient considérablement plus efficaces que d'autres. Le fer adsorbe l'hydrogène 1000 fois plus rapidement lorsqu'il forme des agrégats de 10 atomes que lorsqu'il forme des agrégats de 17 atomes. A. Kaldor et ses collègues ont montré que les vitesses d'adsorption sont supérieures quand l'énergie d'ionisation est plus faible, si bien que l'on supposa que



5. LES EMPILEMENTS COMPACTS d'atomes, dans les solides, sont hexagonaux *(à gauche)* ou cubiques *(au centre)* ; si les agrégats ont de telles structures, on devrait observer l'existence d'agrégats en forme de bipyramide à base pentagonale, de 7 atomes *(structure en couleur sur le schéma de droite)*, et en forme d'Icosaèdre de 13 atomes.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

l'adsorption résultait d'interactions avec des électrons faiblement liés. Cependant on a ensuite découvert que les agrégats de niobium adsorbent l'hydrogène aussi rapidement lorsqu'ils sont ionisés que lorsqu'ils sont neutres : l'efficacité catalytique des agrégats ne dépend pas des électrons périphériques, et résulte autant de la structure géométrique du catalyseur que des liaisons électroniques.

La découverte d'efficacités catalytiques variables, selon la taille des agrégats, a confirmé l'idée que les agrégats constituent un état particulier de la matière. Elle a indiqué que l'on peut sélectionner des agrégats de tailles spécifiques pour catalyser les réactions ; des agrégats non réactifs déposés sur un support le protègeraient.

La catalyse sélective par agrégats représenterait un grand progrès, car la plupart des catalyseurs industriels sont encore élaborés empiriquement. Grâce aux agrégats, on devrait enfin découvrir les mystères de la catalyse. À l'aide de microscopes à effet tunnel, qui donnent des images d'atomes, on étudie aujourd'hui les interactions des agrégats avec leurs substrats, c'est-à-dire les réactifs dont ils catalysent la réaction. On explorera également la migration, le phénomène de fixation d'un agrégat à un support, puis de réarrangement de l'agrégat.

Ernst Schumacher, de l'Université de Berne, a mis au point une méthode originale d'étude des interactions d'agrégats avec leurs substrats : il fait entrer des agrégats de métaux alcalins dans de grandes cages moléculaires, appelées zéolites, qui empêchent les agrégats de participer à des réactions parasites, mais leur laissent le pouvoir de catalyser la polymérisation de l'éthylène en polyéthylène (voir *Les zéolites synthétiques*, par George Kerr, *Pour la Science*, n° 143, septembre 1989). En reprenant ce procédé avec des agrégats de métaux de transition, on espère obtenir des catalyseurs très sélectifs. Toutefois on ne pourra améliorer les catalyseurs à base d'agrégats que si l'on étudie ce nouvel état de la matière.

On devra tout d'abord élucider les relations entre la nature des métaux et la taille des agrégats, d'une part, et le pouvoir catalytique, d'autre part. Puis on devra déposer des agrégats de tailles sélectionnées sur des supports appropriés, par exemple en les empilant afin de former des réseaux tridimensionnels qui guideront la croissance des molécules – comme le font les enzymes. Si ces recherches aboutissent, la chimie de synthèse progressera considérablement.

Très important Centre de Recherche Pharmaceutique situé en région parisienne recrute :

CHERCHEUR

(PNEUMOLOGIE)

De formation Doctorat ou PhD, vous aurez à contribuer à la découverte de nouveaux médicaments dans le domaine de la réactivité bronchique inflammatoire ou mécanique.

La connaissance des modèles pharmacologiques expérimentaux est indispensable et une expérience industrielle serait fortement appréciée.

Merci d'adresser une lettre manuscrite, photo et CV à Média-System, sous la référence 67816, 6 impasse des Deux-Cousins, 75849 Paris Cedex, qui transmettra.

MEDIA-SYSTEM

Notre laboratoire est l'un des tout premiers en France. Notre centre de recherche sur le médicament est en Région parisienne. Nous recrutons un

Biologiste

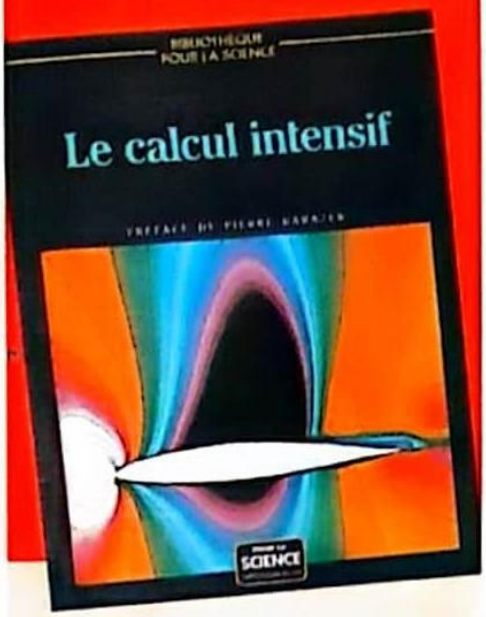
OSTEOPOROSE INFLAMMATION DOULEUR

Ce chercheur, spécialisé dans la Pharmacologie des maladies rhumatismales et le métabolisme osseux, sera chargé de la mise en place et de l'utilisation de modèles expérimentaux susceptibles de conduire à des innovations thérapeutiques. La formation sera Doctorat ou PhD. Une expérience industrielle sera fortement appréciée.

Merci d'adresser lettre manuscrite, photo et C.V. sous la référence 67815 à Média-System, 6 impasse des Deux Cousins, 75849 Paris Cedex 17, qui transmettra.

MEDIA-SYSTEM

BIBLIOTHEQUE POUR LA SCIENCE



LE CALCUL INTENSIF

Les grands problèmes qui résistent encore aux plus puissants ordinateurs et aux plus subtils mathématiciens sont des défis. Ce livre décrit le recul des limites du calcul dans les principales utilisations de l'ordinateur, les grands axes de recherche et les succès des méthodes de calcul intensif.
Grâce aux progrès du calcul intensif, les informaticiens optimisent la planification et la gestion industrielles, simulent des expériences de soufflerie, effectuent des calculs formels, utilisent des méthodes statistiques pour déterminer l'architecture des grands réseaux.
L'informatique est beaucoup plus qu'un ensemble de règles contraignantes, c'est un art de vivre avec l'ordinateur.

POUR LA SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande page 98 A

Les agrégats en couches minces

De minces couches d'agrégats ayant des propriétés électroniques spécifiques auraient un intérêt considérable en micro-électronique. Les recherches commencent à peine, mais on envisage déjà des applications extraordinaires, pour les mémoires optiques, le traitement d'image et la supraconductivité. Si l'on parvient à construire des pièces à partir de réseaux d'agrégats, on pourra envisager de fabriquer des systèmes électroniques à l'échelle moléculaire. On pourrait même réaliser une interface qui relierait un système électronique et un système biologique, comme les systèmes neuronaux : une telle machine pourrait transmettre les données d'une caméra de télévision au cerveau d'un aveugle.

Dans une première étape, on devra former de petites plaques d'une dizaine de nanomètres d'épaisseur. On synthétise déjà des réseaux cristallins précis, atome par atome, par la technique d'épitaxie par jet moléculaire ; si l'on parvenait à créer des réseaux dont les unités fussent des agrégats, on produirait des films de structure plus complexe. On a imaginé de projeter les agrégats sur un substrat avec suffisamment de force pour les réorganiser sans les détruire. Isao Yamada et ses collègues, du Laboratoire de faisceaux ioniques de l'Université de Kyoto, ont appliqué cette technique à des agrégats de divers matériaux, notamment d'aluminium, qu'ils projetaient sur du silicium ; les films formés possèdent des épaisseurs, des coefficients de réflexion et des résistances à l'oxydation uniformes.

Récemment nous avons découvert que des métaux qui ne forment pas d'alliages, comme le fer et le bismuth, peuvent former des agrégats mixtes en phase gazeuse. Si l'on formait des couches minces de tels agrégats, on obtiendrait une nouvelle classe d'alliages aux qualités hybrides intéressantes.

On tente aujourd'hui de former des couches minces supraconductrices à partir d'agrégats. Nous avons préparé des agrégats d'oxyde de cuivre, d'yttrium et de baryum qui pourraient former de telles couches. Cette recherche n'en est qu'à ses débuts, et on dispose de trop peu d'agrégats de taille précise pour former des couches utilisables dans l'industrie.

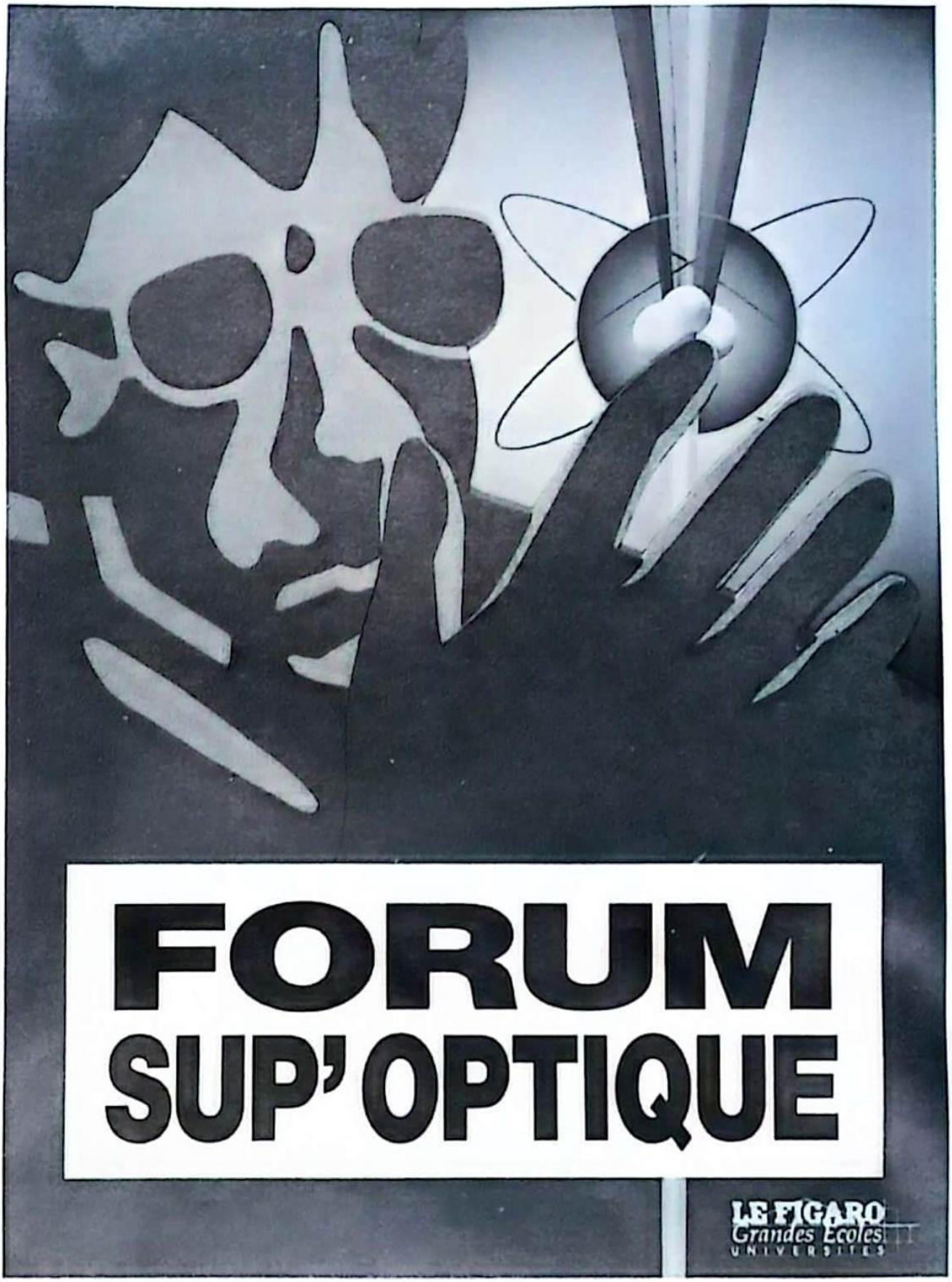
Les agrégats de certains métaux absorbent fortement la lumière : leurs électrons de valence sont nombreux, le rapport entre leur surface et leur volume est élevé (beaucoup d'électrons se trouvent ainsi près de la surface), et leurs nuages électroniques se polarisent (se déforment) facilement. Connaissant la nature chimique et la taille d'un agrégat donné, on sait calculer les longueurs d'onde lumineuses qu'il absorbe. En suspension dans un milieu transparent, les agrégats peuvent constituer des détecteurs efficaces de rayonnements, des filtres spécifiques d'une longueur d'onde, ou des éléments d'un système à mémoire optique.

On pourrait enfin exploiter les propriétés chimiques et optiques des agrégats pour produire des films photographiques aux propriétés nouvelles. Quand on expose un film photographique, les photons heurtent de minuscules cristaux d'halogénure d'argent et en transforment des parties en agrégats d'argent métallique ; ces agrégats servent de catalyseurs pendant le développement, qui transforme les restes des cristaux en argent métallique. Si l'on savait fabriquer des agrégats plus sensibles à la lumière – peut-être en utilisant d'autres métaux – on déposerait des particules plus fines de ces agrégats, et l'on produirait des films au pouvoir de résolution supérieur.

La forte réactivité et la précision des mécanismes de photo-émission des agrégats pourraient également être utiles dans des lasers. James Gole, de l'Institut de technologie de Géorgie, a montré que les agrégats triatomiques de sodium, en réagissant avec le chlore, produisent suffisamment de sodium diatomique dans un état excité pour qu'une inversion des populations apparaisse : le nombre de dimères de sodium dans un état excité devient supérieur au nombre de dimères de sodium dans l'état fondamental ; lorsque cette inversion de population a eu lieu, un photon fait revenir les dimères excités dans l'état fondamental et provoque ainsi l'émission de nombreux photons : le système émet un faisceau cohérent et intense dont la longueur d'onde se trouve à l'extrémité vert-bleu du spectre visible. Comme cette couleur est transmise par l'eau, un laser à base d'agrégats triatomiques de sodium pourrait transmettre des informations dans l'océan.

Au cours de la dernière décennie, la science des agrégats est devenue pluridisciplinaire ; elle a posé des questions fondamentales concernant la nature des surfaces. La physico-chimie de ce nouvel état de la matière n'en est qu'à ses débuts, mais nous percevons son importance dans des domaines aussi variés que la science des matériaux, l'électronique ou l'astrophysique. ■

MARDI 6 FEVRIER 1990



FORUM SUP'OPTIQUE

LE FIGARO Grandes Ecoles UNIVERSITÉS

ECOLE SUPERIEURE D'OPTIQUE

69 41 68 98

Centre Scientifique d'Orsay - Bât. 503 - BP 147 - 91403 ORSAY Cedex

RER B LE GUICHET - N 118, sortie : Centre Universitaire

Les premières photographies en couleurs

GRANT ROMER JEANNETTE DELAMOIR

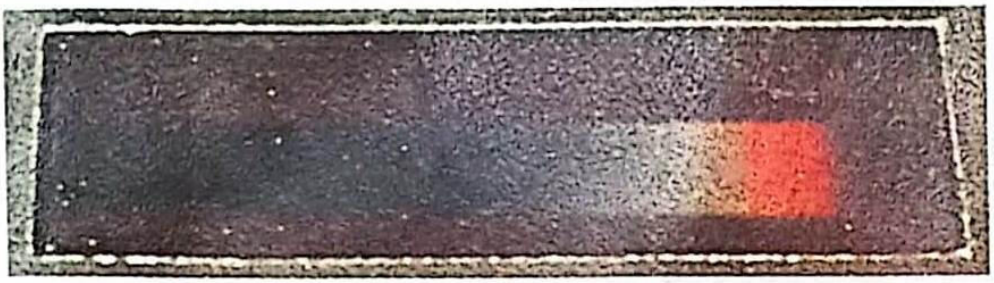
Les premiers procédés de reproduction d'images en couleurs étaient compliqués, mais ingénieux.

On a tort de croire que la photographie en couleurs est une invention des temps modernes. Naturellement la plupart des images photographiques datant du XIX^{e} siècle sont quasi monochromes, mais la photographie en couleurs d'aujourd'hui résulte de recherches effectuées au début du XIX^{e} siècle ; elle est même née avant le lancement commercial du daguerréotype, dont on fête actuellement le 150^{e} anniversaire.

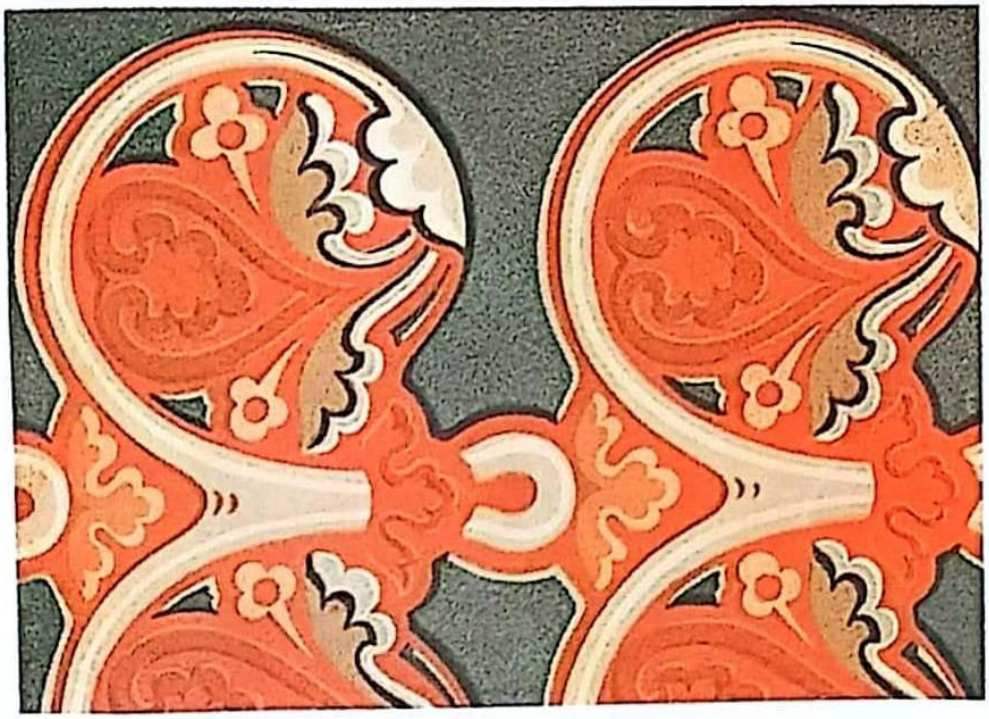
Vers les années 1800, les pionniers de la photographie rêvent tous d'images photographiques en couleurs : puisque les systèmes optiques transmettent des images en couleurs, pourquoi n'enregistrerait-on pas ces images avec toutes leurs couleurs ? Les premières tentatives visent à réaliser, directement, une reproduction en couleurs, au moyen d'un composé photosensible unique, sensible à tous les rayonnements du spectre visible. On

1. LA PHOTOGRAPHIE EN COULEURS est née au début du XIX^{e} siècle, mais n'est devenue adulte qu'un siècle plus tard. Un daguerréotype de 1845, colorié à la main (ci-dessus), *et une photographie en couleurs de 1907* (à droite) *montrent les extraordinaires progrès réallsés. Les daguerréotypes ont connu un succès immédiat, lors de leur commercialisation, en 1839, mais les procédés de photographie en couleurs se sont difficilement imposés. La photographie de droite a été réalisée par le procédé* Autochrome, *inventé par les frères Auguste et Louis Lumière : on filtrait la lumière à travers des grains de fécule de pomme de terre* (voir la figure 7).

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990



2. CETTE PHOTOGRAPHIE DU SPECTRE VISIBLE a été réalisée en 1848 par le physicien français Edmond Becquerel ; elle est conservée au Musée scientifique de Londres. Becquerel enduisait de chlorure d'argent une plaque de daguerréotype et l'exposait aux rayonnements lumineux séparés par un prisme ; le composé photosensible prenait les diverses teintes de la lumière. Lors des premières expériences de photographie en couleurs, la plupart des inventeurs utilisaient ce type de reproduction directe.



3. LE PROCÉDÉ PAR CONTACT (en haut) *est une autre méthode de reproduction directe des couleurs. Vers 1850, le Français Abel Niepce de Saint-Victor, neveu de Joseph-Nicéphore Niepce, qui réalisa la première photographie, obtint cette image en exposant une plaque au chlorure d'argent placée en contact avec un dessin* (en bas), *sans doute un morceau de papier peint mural.*

connaît beaucoup de substances qui changent de couleur lorsqu'elles sont insolées ; quelques-unes d'entre elles prennent même les couleurs de la lumière qu'elles reçoivent.

En 1810, Thomas Johann Seebeck, un physicien allemand qui étudie la théorie de la couleur avec Goethe, décrit ainsi les réactions du chlorure d'argent aux diverses couleurs de la lumière : Seebeck imprègne un papier d'une solution de chlorure d'argent et l'expose pendant un quart d'heure à de la lumière dispersée par un prisme ; le chlorure d'argent insolé prend quelques-unes des couleurs du spectre, ne serait-ce que légèrement. Seebeck ne comprend pas le phénomène (l'explication ne sera donnée qu'en 1868).

Dix ans après ces travaux, Louis-Jacques-Mandé Daguerre, peintre décorateur, cherche à reproduire la couleur au moyen de divers sels minéraux phosphorescents. Il a entendu parler des travaux d'un inventeur français, Joseph-Nicéphore Niepce, qui a réalisé la première photographie de l'histoire en exposant une plaque d'étain enduite de bitume de Judée ; en polymérisant, le bitume avait produit une image monochrome.

Les daguerréotypes

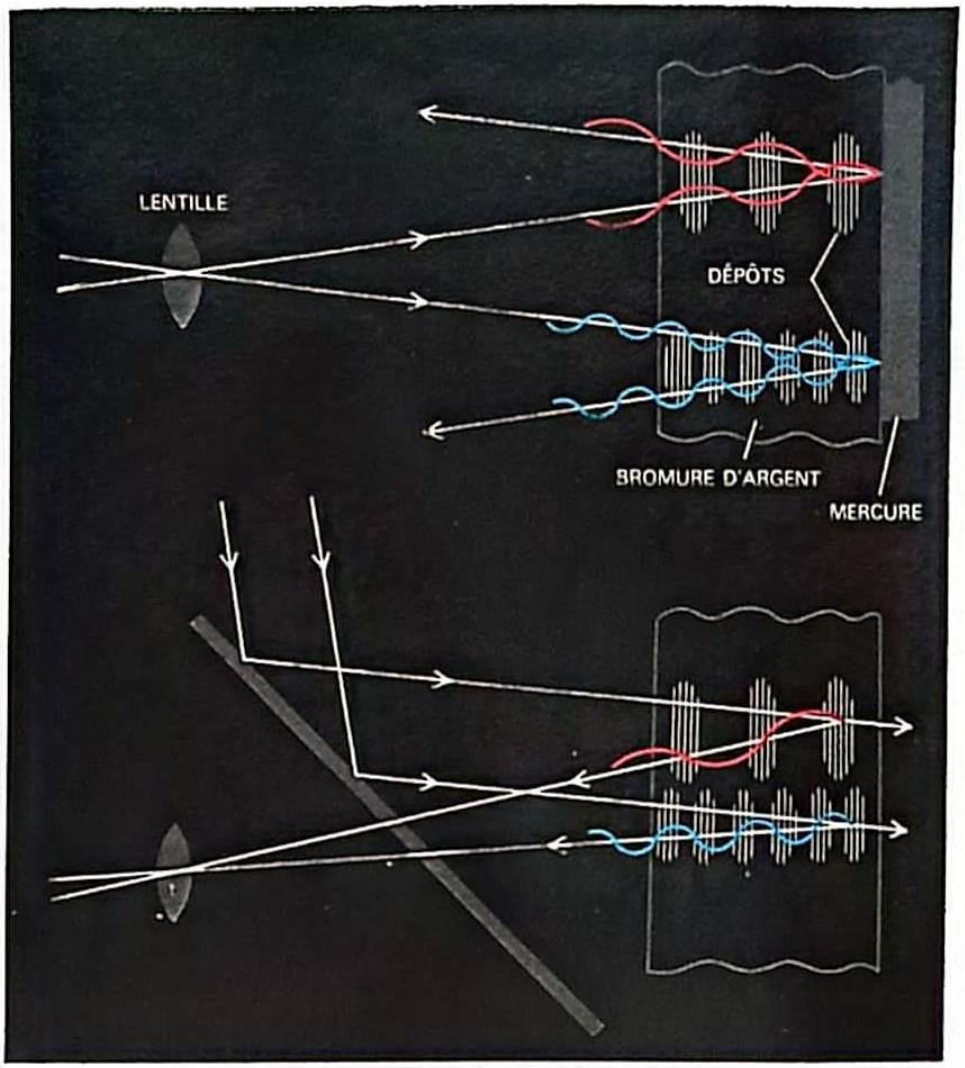
Daguerre propose à Niepce de collaborer et, après quelques hésitations, Niepce accepte. En 1829, ils se lancent dans une série d'expériences sur des plaques argentées, sensibilisées avec des vapeurs d'iode. En 1833, Niepce meurt, mais quatre ans plus tard, Daguerre met au point le procédé de ce qu'il appelle injustement des « daguerréotypes » et dont il garde le secret jusqu'en 1839. Cette même année, l'Anglais William Henry Fox Talbot et le Français Hippolyte Bayard inventent le négatif et la reproduction de plusieurs positifs.

Le daguerréotype est le premier procédé photographique vraiment commode. Les images sont produites par l'exposition, dans une chambre noire, d'une plaque de cuivre recouverte d'argent, traitée par des vapeurs d'iode. L'image latente est révélée par des vapeurs de mercure, qui forment un amalgame avec l'argent partout où la plaque a été exposée ; la diffusion de la lumière par l'amalgame et sa réflexion par la couche d'argent se combinent pour produire une image positive. Plusieurs années après son invention, la méthode est améliorée par le recours à d'autres halogènes que

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

l'iode : la durée d'exposition des plaques traitées au brome ou au chlore est réduite. Talbot, d'autre part, utilise un papier saturé par le chlorure d'argent afin de réaliser des épreuves de contact à partir de négatifs sur papier.

Par leurs diverses méthodes, Niepce, Daguerre, Talbot, Bayard et



4. LE PROCÉDÉ DE LIPPMANN constitue la dernière tentative notable de reproduction directe des couleurs. Dans les années 1890, le physicien français Gabriel Lippmann tira parti des nouvelles théories sur les ondes lumineuses afin d'exposer des émulsions qui avaient été récemment mises au point. Il enduisait une plaque de verre (non représentée ici) *de bromure d'argent et disposait la plaque à l'intérieur d'une chambre noire, de telle manière que l'émulsion fût en contact avec une couche mince de mercure. La lumière qui pénétrait dans la chambre noire se réfléchissait sur le mercure, et les « ondes stationnaires » formées par interférence des ondes incidentes et des ondes réfléchies sur le mercure, faisaient précipiter l'argent de l'halogénure à des intervalles d'une longueur d'onde* (schéma supérieur). *Quand on observait ultérieurement la plaque sous un certain angle, les dépôts d'argent réfléchissaient la lumière des longueurs d'onde, ou couleurs, qui les avaient produites* (schéma inférieur). *Lippmann obtint ainsi, en 1890, des images aux couleurs vives, comme celle qui est reproduite ci-dessous, représentant le château de Versailles.*

d'autres obtiennent des résultats parfois très colorés, mais monochromes : l'image enregistrée réfléchit parfois vivement une couleur, mais elle n'en réfléchit qu'une. Souvent on pallie cette incapacité à reproduire les couleurs par un coloriage manuel *(voir la figure 1)*. Comment l'éviter et enregistrer directement les couleurs naturelles ?

La couleur

On reconsidère alors les expériences fondatrices de Seebeck. En 1840, l'astronome anglais John Herschel les répète et examine méthodiquement les propriétés spectrales de divers sels d'argent. Ses travaux intéressent le physicien français Edmond Becquerel qui, en 1847, enregistre des spectres colorés en substituant au papier une plaque de daguerréotype enduite d'une couche mince et polie de chlorure d'argent. Il obtient des résultats encourageants *(voir la figure 2)*.

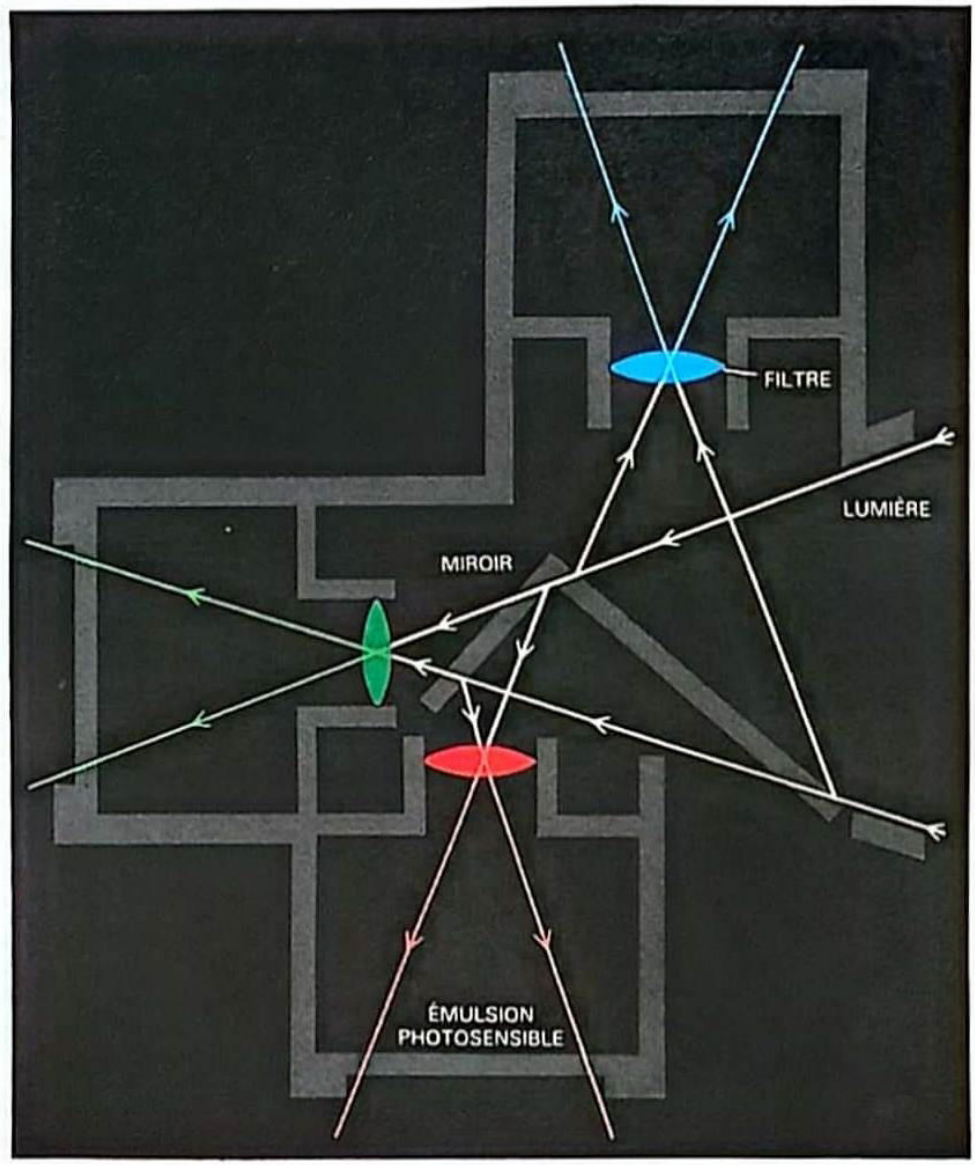
En 1851, Abel Niepce de Saint-Victor, un neveu de Joseph-Nicéphore Niepce, reprend les travaux de Becquerel et les améliore en modifiant l'application du chlorure d'argent et en fixant les couleurs au moyen d'un verni. L'une de ses meilleures reproductions d'un spectre est exposée au Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), à Paris. Niepce de Saint-Victor utilise des chambres noires afin de reproduire des natures mortes sur des plaques au chlorure d'argent ; il réalise également des images colorées par contact sur papier à partir de motifs coloriés manuellement *(voir la figure 3)*.

Le procédé de Niepce de Saint-Victor reste cependant du domaine expérimental, car ses images ne sont pas permanentes et la durée d'exposition nécessaire à l'enregistrement de toutes les couleurs est rédhibitoire (jusqu'à une heure). En 1851, quand Niepce de Saint-Victor entreprend ses expériences sur la couleur, le pasteur américain Levi Hill, faisant commerce de daguerréotypes, prétend avoir découvert le moyen de réaliser des daguerréotypes en couleurs : il collecte la somme de 15 000 dollars auprès de souscripteurs, mais personne ne parvient à reproduire ses résultats et il est finalement considéré comme un charlatan. Récemment, toutefois, Joseph Boudreau, du Collège de Hamden, a obtenu des images en couleurs grâce aux instructions publiées par Hill. En outre, on a vérifié que certaines couleurs des photographies de Hill ont été formées par un procédé photographique ; la méthode de Hill semble avoir été très voisine de celles de Becquerel et de Niepce de Saint-Victor.

Interférences et vision des couleurs

En 1868, le physicien allemand Wilhelm Zenker explique que les plaques au chlorure d'argent reproduisent les couleurs parce que les ondes lumineuses interfèrent dans le milieu photographique ; les ondes lumineuses sont réfractées par le chlorure d'argent, réfléchies sur la plaque d'argent polie, et forment ce que l'on appelle des ondes stationnaires *(voir la figure 4)*. Là où les crêtes et les creux coïncident, indique Zenker, le chlorure d'argent est activé et de l'argent métallique se dépose ; là où les points de vibration nulle se superposent, l'argent reste ionique. Examinés ensuite à la lumière blanche – qui comprend toutes les longueurs d'onde du spectre visible –, les grains d'argent ne réfléchissent que les longueurs d'onde de la lumière qui les a créés : ils ne réfléchissent que la couleur à laquelle le chlorure d'argent a été initialement exposé.

Cette théorie est confirmée en 1889 par le physicien allemand Otto Wiener, dont les travaux conduisent à la réalisation d'une photographie en couleurs stable, en 1891 : le physicien français Gabriel Lippmann invente un



5. LA CHAMBRE NOIRE de l'inventeur français Louis Ducos du Hauron enregistrait les couleurs indirectement, au moyen d'enregistrements séparés du rouge, du bleu et du vert. Ducos du Hauron utilisa pour sa chambre noire des miroirs semi-réfléchissants qui divisaient la lumière ; il séparait le faisceau en trois et isolait chaque couleur primaire en interposant des filtres sur le trajet des faisceaux formés. Les émulsions des années 1870 étaient insuffisamment sensibles pour être utilisées dans cette chambre noire, mais Ducos du Hauron adapta son procédé afin de produire des photographies en couleurs remarquables, comme la nature morte prise en 1877, à droite.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

système ingénieux qui tire parti des émulsions photosensibles sur plaques de verre, introduites dans les années 1850. Lippmann place une plaque de verre enduite d'une émulsion très mince de bromure d'argent sur un cadre au contact d'une autre plaque, elle-même recouverte d'un film de mercure liquide. Le mercure sert de miroir, tout comme la plaque à l'argent dans les expériences de Niepce de Saint-Victor.

Quand Lippmann place l'ensemble des deux plaques dans une chambre noire et qu'il expose l'émulsion, la lumière traverse la plaque de verre et l'émulsion et se réfléchit sur le miroir de mercure ; l'interférence des ondes incidentes et réfléchies engendre des ondes stationnaires. Au cours du développement, des dépôts d'argent d'épaisseur égale à la moitié de la longueur de l'onde lumineuse qui les produit se forment dans l'émulsion de bromure d'argent.

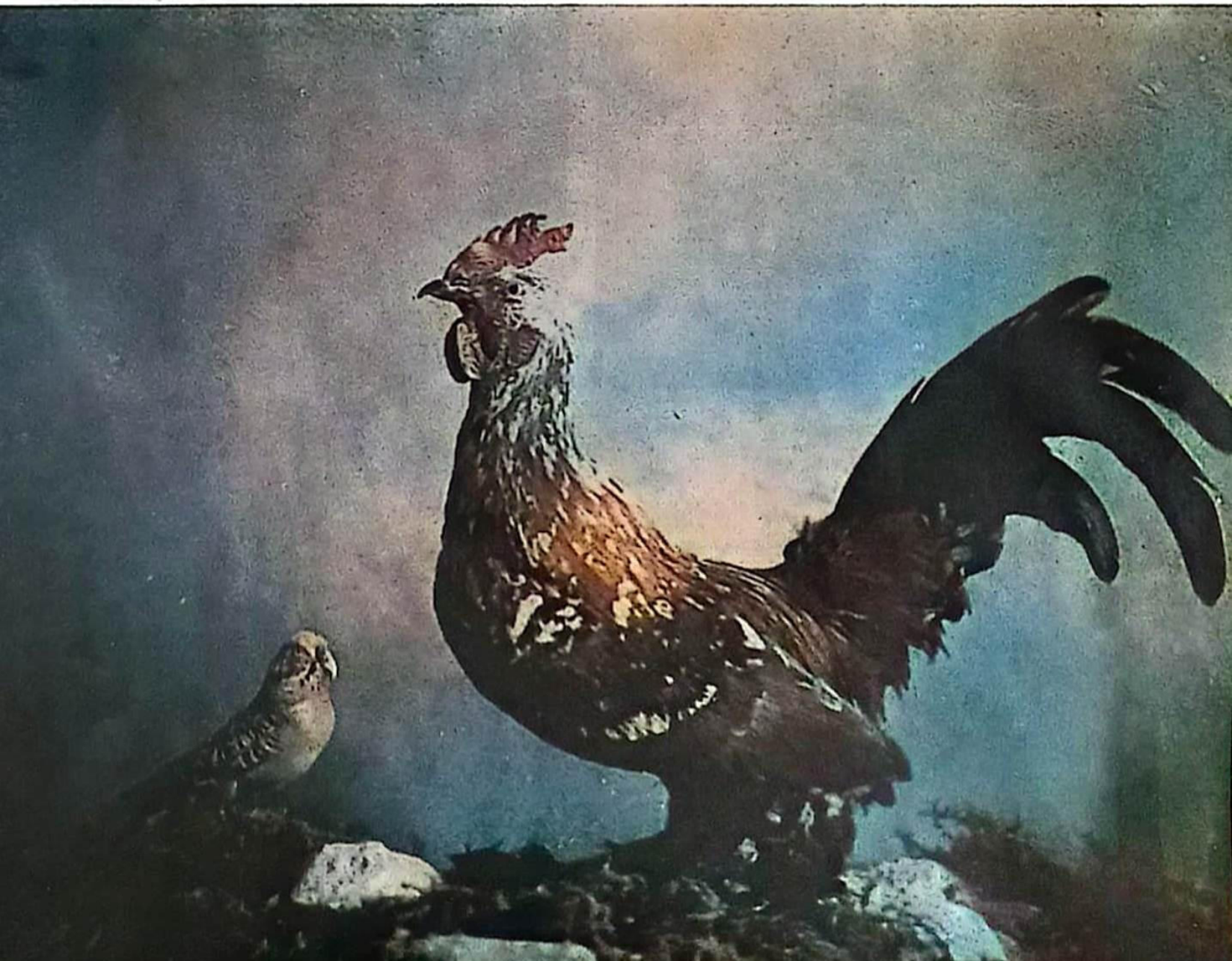
Après le développement, l'image ressemble à un négatif normal, mais quand on le regarde sous un certain angle, la lumière qui se réfléchit fait apparaître des couleurs brillantes, fidèles aux teintes naturelles. Malgré la longueur des expositions et les difficultés de manipulation du mercure, les couleurs fixées par le procédé de Lippmann sont si belles que le succès commercial du procédé dure jusqu'en 1907.

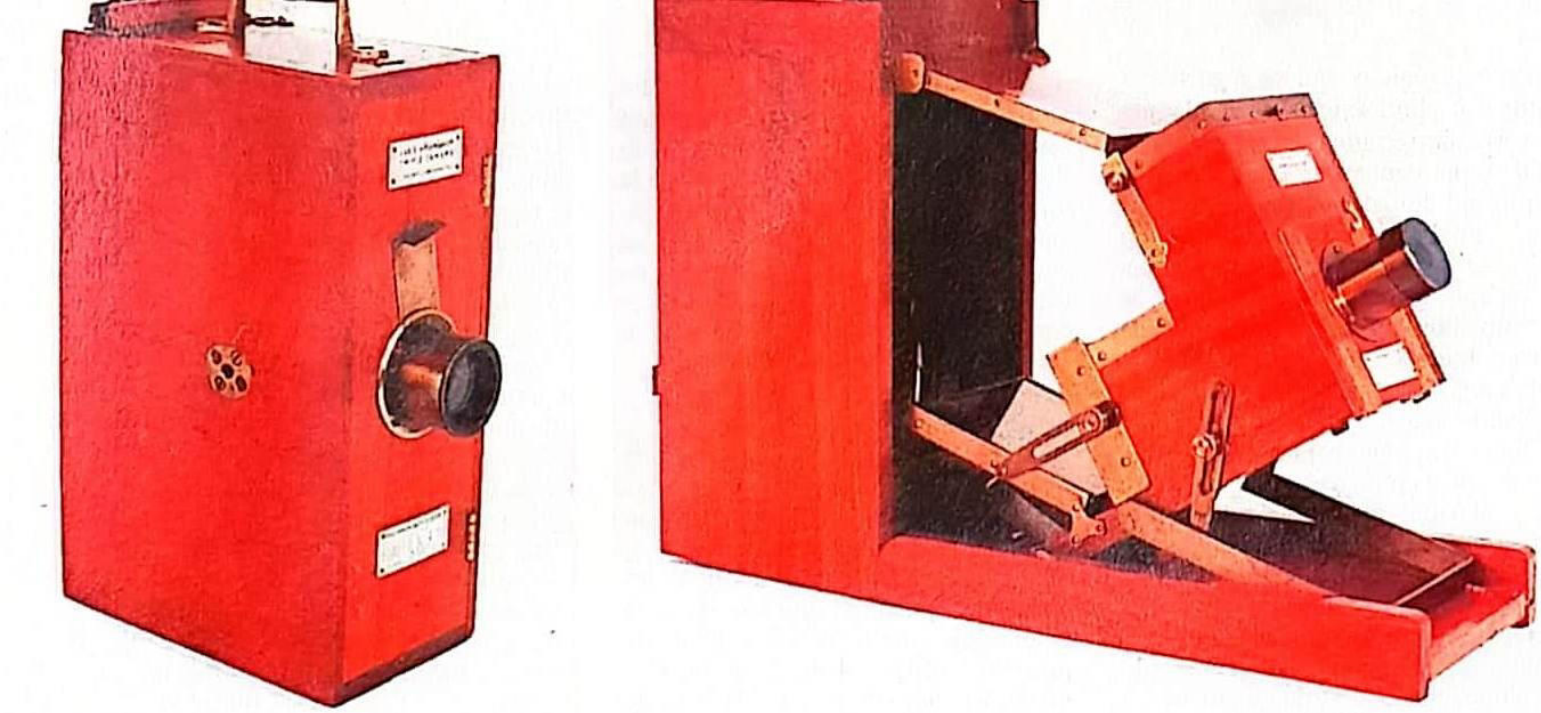
La naissance des procédés modernes

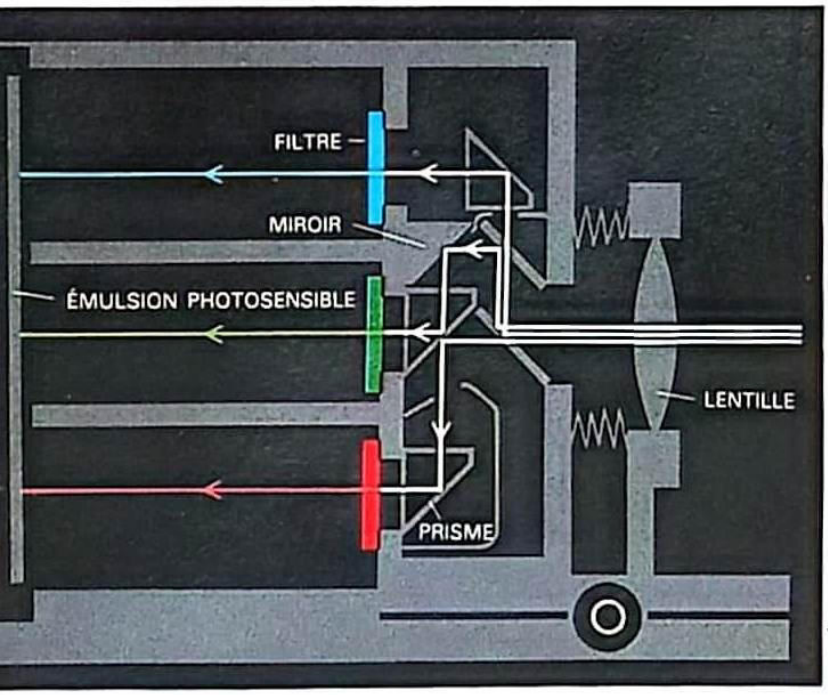
La technique de Lippmann est finalement supplantée par des méthodes indirectes de production des images en couleurs : on reconstitue le spectre en combinant les couleurs primaires rouge, bleue et verte. Ces méthodes indirectes sont à la base de la photographie en couleurs moderne ; pour comprendre comment la photographie en couleurs a évolué, revenons un peu en arrière, avant l'époque du daguerréotype.

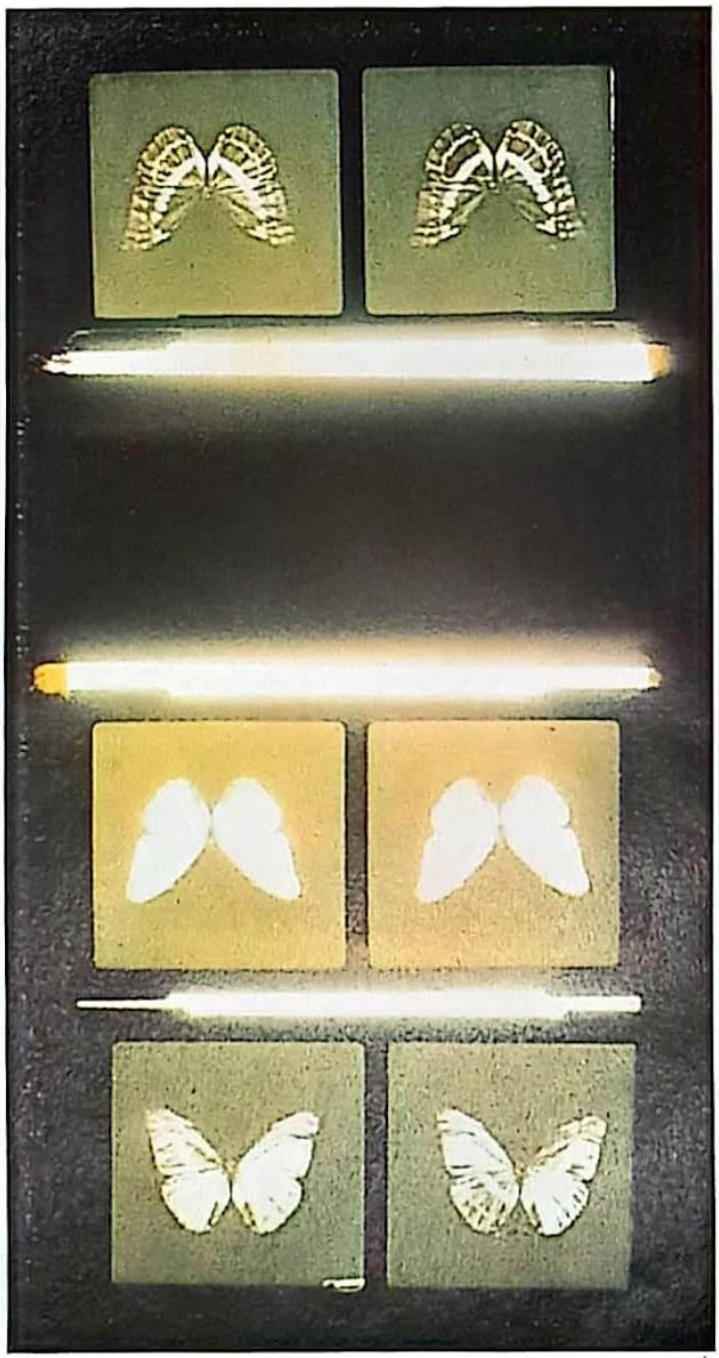
En 1801, le physicien et médecin anglais Thomas Young présente sa théorie de la vision des couleurs devant la Société royale de Londres : dans l'œil humain, chaque point de la rétine comporterait trois récepteurs sensibles à une couleur primaire ; la stimulation de ces trois types de récepteurs à des degrés divers engendrerait le sentiment des diverses couleurs. Avec cette théorie, la couleur apparaît pour la première fois comme un phénomène physiologique plutôt que comme une substance matérielle. Cette percée théorique et les progrès de l'imprimerie, où l'on reproduit des couleurs par superposition de trois couleurs ou plus, ouvrent la voie pour la mise au point de procédés photographiques où l'on reproduit les couleurs de façon indirecte.

On tente d'abord d'utiliser cette théorie en enregistrant séparément les trois composantes primaires de la couleur et en les recombinant afin d'obtenir une image en couleurs. Généralement on sépare les couleurs en réalisant trois négatifs mono-









6. LA CHAMBRE NOIRE ET LA VISIONNEUSE KROMSKOP (en haut) *fonctionnaient selon les principes établis par Ducos du Hauron. Quand ces appareils furent commercialisés par l'inventeur américain Frederic Ives, en 1895, des émulsions plus sensibles avaient facilité la mise en œuvre des principes dégagés par Ducos du Hauron. La chambre noire comportait des miroirs semi-réfléchissants qui divisaient les faisceaux lumineux, des prismes qui déviaient la lumière et des filtres qui séparaient les couleurs primaires. Les trois faisceaux parcouraient des distances égales avant d'atteindre les émulsions photosensibles. Une version plus complexe de l'appareil comportait deux objectifs et produisait des images stéréoscopiques* (à droite).

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

chromes, respectivement exposés à travers des filtres rouge, bleu et vert ; on transforme ensuite les trois négatifs en images positives, puis on les recombine soit par synthèse « additive », soit par synthèse « soustractive ».

Dans les procédés additifs, on reconstitue les images en mélangeant les trois lumières primaires soit par la projection simultanée de trois images monochromes différentes, soit par la juxtaposition de petites lignes ou de petits points de couleurs primaires, de manière à ce que l'œil effectue la synthèse. Les systèmes soustractifs, en revanche, utilisent des colorants complémentaires des couleurs – le cyan (bleu-vert), le magenta (bleu-rouge) et le jaune (vert-rouge) – absorbant chacun une couleur primaire de manière sélective et laissant percevoir les deux autres ; le cyan, par exemple, absorbe le rouge, le magenta absorbe le vert et le jaune absorbe le bleu.

En 1861, le physicien écossais James Clerk Maxwell est le premier à appliquer à la photographie le principe de la synthèse additive. Dans un projecteur de diapositives, Maxwell superpose trois positifs en noir et blanc d'un morceau de ruban à cheveux ; chaque diapositive a été photographiée à travers une plaque de verre coloré ou un liquide transparent, et Maxwell projette chacune d'entre elles à travers un filtre de même couleur. Les trois images combinées recréent les différentes teintes du ruban.

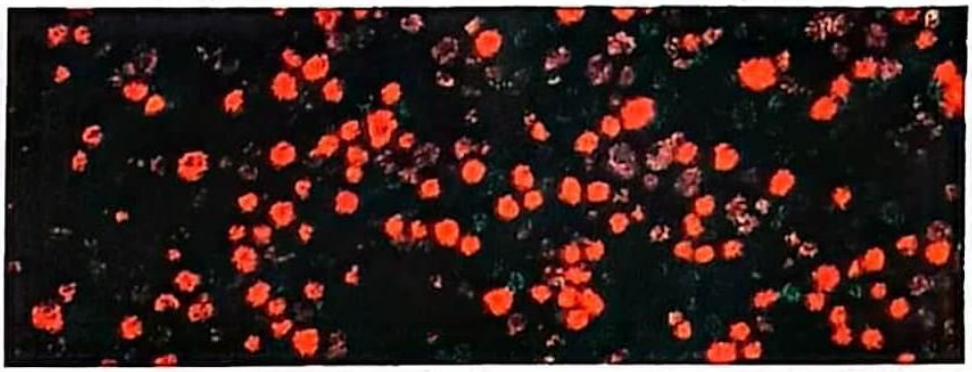
Maxwell ne réalise cependant cette expérience que pour vérifier ses théories de colorimétrie (la mesure des couleurs), et il ne les exploite pas pour la photographie. Or la transposition à la photographie est difficile, car les émulsions dont on dispose à l'époque sont beaucoup plus sensibles à la lumière bleue qu'aux autres rayonnements ; même quand on allonge l'exposition au rouge et au vert, les négatifs du rouge et du vert sont moins contrastés que ceux du bleu.

La trichromie

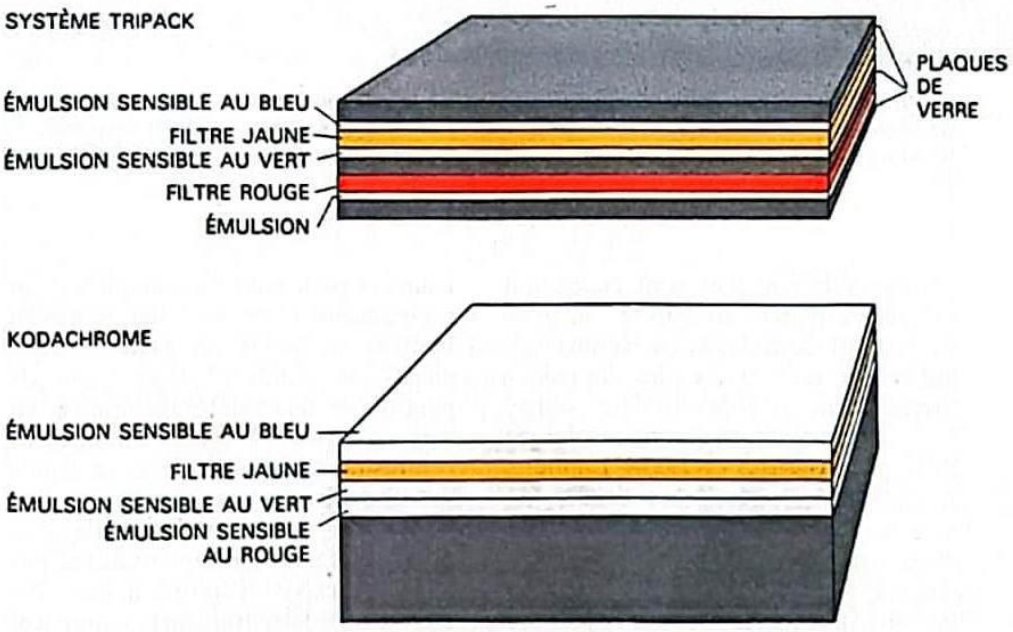
En 1862, un an après le travail de Maxwell, un jeune Français de 25 ans, Louis Ducos du Hauron, passe en revue le principe de tous les systèmes de photographie en couleurs et propose ce qui deviendra la base des procédés modernes : sélectionner les couleurs au moyen de filtres, puis superposer les positifs en couleurs primaires sur une seule épreuve. Un peu plus tard, il met cette idée... à l'épreuve et expose, en 1869, les premières épreuves photographiques réussies en trichromie, à partir d'une synthèse additive des couleurs. Indépendamment l'inventeur et poète Charles Cros propose un système analogue la même année.

En 1868, Ducos du Hauron a cependant imaginé un moyen de simplifier la méthode des trois filtres et des trois négatifs : l'exposition d'une émulsion à travers un écran de lignes très fines, rouges, jaunes et bleues, tracées sur du verre. Seule la lumière rouge traverserait les lignes rouges et les exposerait ; de même, les lignes bleues et les lignes jaunes ne laisseraient respectivement passer que la lumière bleue et la lumière jaune. En superposant très précisément au positif un écran similaire, les zones exposées du positif réfléchiraient la lumière à travers certaines lignes de couleur : celles-là mêmes qui ont produit l'exposition ; les fines lignes des couleurs primaires se mélangeraient dans l'œil de l'observateur pour recréer les couleurs d'origine.

Ducos du Hauron n'a cependant pas les moyens financiers pour tester cette idée et, quelques années plus tard, des inventeurs la reprennent en Irlande et aux États-Unis. Les sys-



7. DANS LE PROCÉDÉ AUTOCHROME, des grains de fécule de pomme de terre, colorés dans des teintes proches de trois couleurs primaires, remplissaient la même fonction que les filtres des chambres noires de Ducos du Hauron (voir la figure 6). *Le procédé* Autochrome *fut mis au point par les pionniers du cinématographe, Auguste et Louis Lumière, en 1907. Une couche de l'épaisseur d'un grain de fécule était incorporée à l'émulsion photographique avant l'exposition ; après l'exposition et le blanchiment, la lumière diffusée à travers les grains recréait les couleurs primaires, que l'œil mélangeait pour reconstituer les couleurs des objets.*



8. L'ÉMULSION Tripack (en haut) *et son successeur, l'émulsion* Kodachrome (en bas) *combinaient les négatifs des trois couleurs primaires sur une plaque unique. Dans le procédé* Tripack, *inventé par Ducos du Hauron en 1897, on superposait à une plaque de verre enduite de bromure d'argent (qui, lors d'une brève exposition, est sensible au bleu), un filtre jaune (qui ne laisse passer que la lumière rouge et la lumière verte), une mince couche d'émulsion sensible au vert, un filtre rouge et une dernière émulsion sensible à toutes les couleurs. L'émulsion moderne* Kodachrome *est presque identique, mais le filtre rouge n'est plus nécessaire : des émulsions sensibles au rouge sont apparues dans les années 1930, quand le système* Kodachrome *fut lancé.*

9. L'INCENDIE DU « HINDENBURG », en 1937, est représenté sur ces photographies en couleurs. Les émulsions capables d'enregistrer simultanément trois couleurs sur un négatif unique – comme dans le système **Tripack** *– ont permis l'enregistrement en couleurs d'événements inattendus et rapides. Ces images furent prises par un photographe du* **Sunday Mirror**, *à l'aide d'émulsions* **Kodachrome**.

tèmes qu'ils réalisent sont cependant difficiles à mettre en œuvre : la prise de vue est complexe, les écrans rainurés très coûteux, et les émulsions enregistrent mal la lumière rouge. Tous ces problèmes seront résolus en 1907 par Auguste et Louis Lumière, déjà célèbres pour leurs études du cinéma : leur plaque *Autochrome* permettra de mettre au point le premier procédé réellement fonctionnel de photographie en synthèse additive.

Le travail des frères Lumière résultera d'un progrès indépendant : en 1907, on mettra au point des émulsions panchromatiques, dont la sensibilité est régulière sur tout le spectre ; le problème de la lumière rouge sera ainsi résolu. En outre, les frères Lumière pallieront les difficultés d'enregistrement et de coûts des écrans en mettant au point un système ingénieux : ils teindront de la fécule de pomme de terre en rouge-orangé, en vert et en violet, puis combineront l'émulsion photosensible et la fécule sur une plaque transparente, en une couche d'épaisseur égale à celle d'un grain de fécule. La lumière filtrée par la fécule expose l'émulsion qui, une fois développée, transmet à nouveau la lumière à travers la fécule : les couleurs auxquelles l'émulsion a été exposée sont reproduites. Le procédé *Autochrome* demeurera commercialement viable jusque dans les années 1930, époque à laquelle il sera détrôné par les procédés *Kodachrome* et autres systèmes précurseurs des synthèses soustractives qui prévalent aujourd'hui.

Avant que le procédé *Autochrome* n'apparaisse, Ducos du Hauron étudie la reproduction des couleurs par synthèse soustractive en augmentant la sensibilité des plaques photographiques au vert et au rouge, grâce à des colorants sensibilisateurs (il tire parti de la découverte de ces colorants, en 1873, par le chimiste allemand Hermann Vogel). Ducos du Hauron ramène les temps d'exposition des plaques rouges et vertes à un niveau identique à ceux des plaques bleues, ouvrant la voie aux expositions simultanées et non plus successives.

Afin de proposer un système d'emploi facile, Ducos du Hauron invente d'abord une chambre noire munie de

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

trois lentilles, permettant l'exposition simultanée de trois clichés ; cependant chaque lentille a une ligne de visée légèrement différente, si bien que les trois clichés ne coïncident pas exactement lors de la reconstitution de l'image. Pour résoudre ce problème, il invente ensuite une chambre noire, dotée d'un objectif unique et où des miroirs divisent le faisceau lumineux en trois, chacun d'entre eux traversant un filtre avant d'atteindre sa plaque photosensible respective *(voir la figure 5)*.

La chambre noire de Ducos du Hauron nécessite toutefois des émulsions encore plus sensibles que celles dont on dispose dans les années 1870. En 1895, ces émulsions sensibles sont mises au point, et l'inventeur américain Frederic Ives commence à commercialiser un système appelé *Kromskop*, qui fonctionne selon les principes établis par Ducos du Hauron *(voir la figure 6)*. La chambre noire d'Ives peut même enregistrer des négatifs stéréoscopiques : maintenus par des rubans, ils sont visionnés grâce à un système copié sur celui qu'avait proposé Ducos du Hauron en 1869.

La photographie en couleurs devient un procédé absolument moderne quand on rassemble les trois négatifs sur une seule plaque. En 1897, Ducos du Hauron invente ainsi le système *Tripack* : il superpose une plaque de verre enduite d'une couche transparente de bromure d'argent (qui, lors d'une brève exposition, est sensible au bleu), un filtre jaune (qui laisse passer les lumières rouge et verte), une mince émulsion sensible au vert et, enfin, une émulsion sensible à toutes les couleurs *(voir la figure 8)*. Il réalise des négatifs à partir des trois positifs, puis tire une épreuve jaune à partir du négatif bleu, une épreuve magenta à partir du vert et une épreuve cyan à partir du rouge. En combinant les épreuves de ces couleurs complémentaires, il obtient la reproduction de toutes les couleurs. Les pellicules couleur modernes descendent directement de ce procédé fondateur.

Nous n'avons considéré que les grandes étapes de l'histoire de la photographie en couleurs au XIX^{e} siècle, et nous avons notamment omis bien des inventions ingénieuses. Beaucoup ne sont plus utilisées aujourd'hui. Puisque les anniversaires sont l'occasion d'évoquer l'histoire, souvenons-nous des techniques du passé : elles pourraient revenir sur la scène et faire progresser encore cette technique en constante évolution qu'est la photographie. ■

médecine sciences, en français, l'excellence.

BULLETIN D'ABONNEMENT ANNUEL

Je souhaite m'abonner à m/s au tarif indiqué ci-dessous.

10 numéros

m/s médecine sciences

Particuliers ☐ 360 F Institutions ☐ 560 F Étudiants ☐ 230 F

Nom de l'abonné _____

Adresse complète _____

_____

_____

Je joins ☐ un chèque postal
☐ un chèque bancaire à l'ordre indiqué ci-contre

John Libbey Eurotext
6, rue Blanche
92120 Montrouge.

p.l.s.l.

L'évolution du champ magnétique terrestre

JEREMY BLOXHAM ■ DAVID GUBBINS

En détectant l'activité magnétique à la surface du Globe, on détermine les mouvements du fer en fusion qui s'écoule dans la partie externe du noyau terrestre et qui engendre le champ magnétique terrestre.

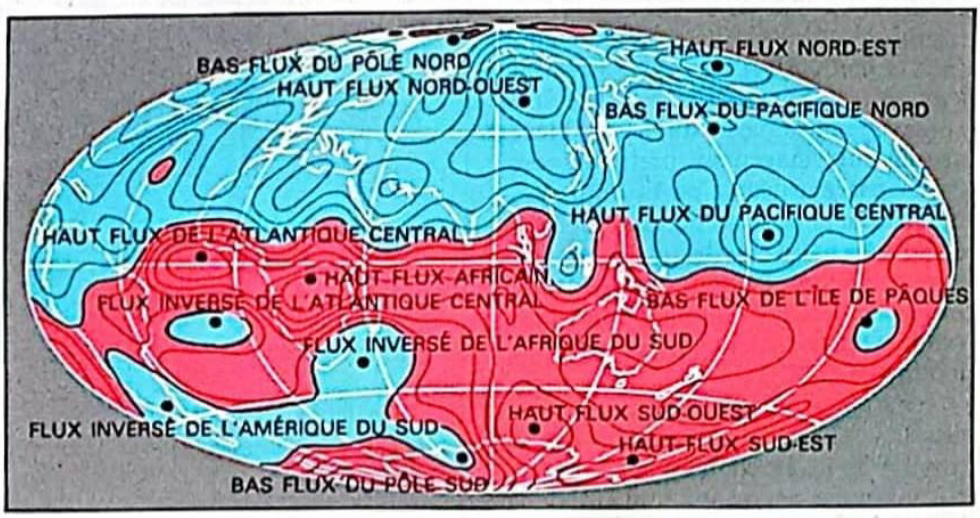
Dans la partie externe du noyau terrestre, à 1200 kilomètres du centre de la Terre, il fait aussi chaud qu'à la surface du Soleil (la température atteint 5800° C) et la pression est supérieure à un million d'atmosphères. Le fer en fusion qui compose le noyau externe circule autour du noyau interne, solide, et engendre le champ magnétique terrestre en agissant comme une dynamo. Des tempêtes magnétiques naissent des remous agitant ce fer, aussi fluide que de l'eau et un peu plus conducteur que du cuivre. À la surface du Globe, à quelque 3000 kilomètres du noyau externe, ces tempêtes provoquent des fluctuations du champ magnétique terrestre.

Pour comprendre et prévoir les variations du champ magnétique, les géophysiciens doivent aussi étudier les mécanismes dans le noyau externe. Cependant l'étude de ces tempête diffère beaucoup des tempêtes dans l'atmosphère : alors que les tempêtes atmosphériques naissent en quelques heures et ne durent que quelques jours, les tempêtes magnétiques apparaissent en plusieurs dizaines d'années et durent des siècles. Par chance, les variations du champ magnétique terrestre sont consignées depuis plus de 300 ans.

Ces neuf dernières années, nous avons recherché plus de renseignements à partir des données historiques, et, en 1983, nous réussissions à dresser une carte du champ magnétique à la surface du noyau externe *(voir la figure 1, à droite)*. Sur ces cartes, on a détecté des structures remarquables et élucidé les mécanismes de la géodynamo qui engendre le champ magnétique terrestre.

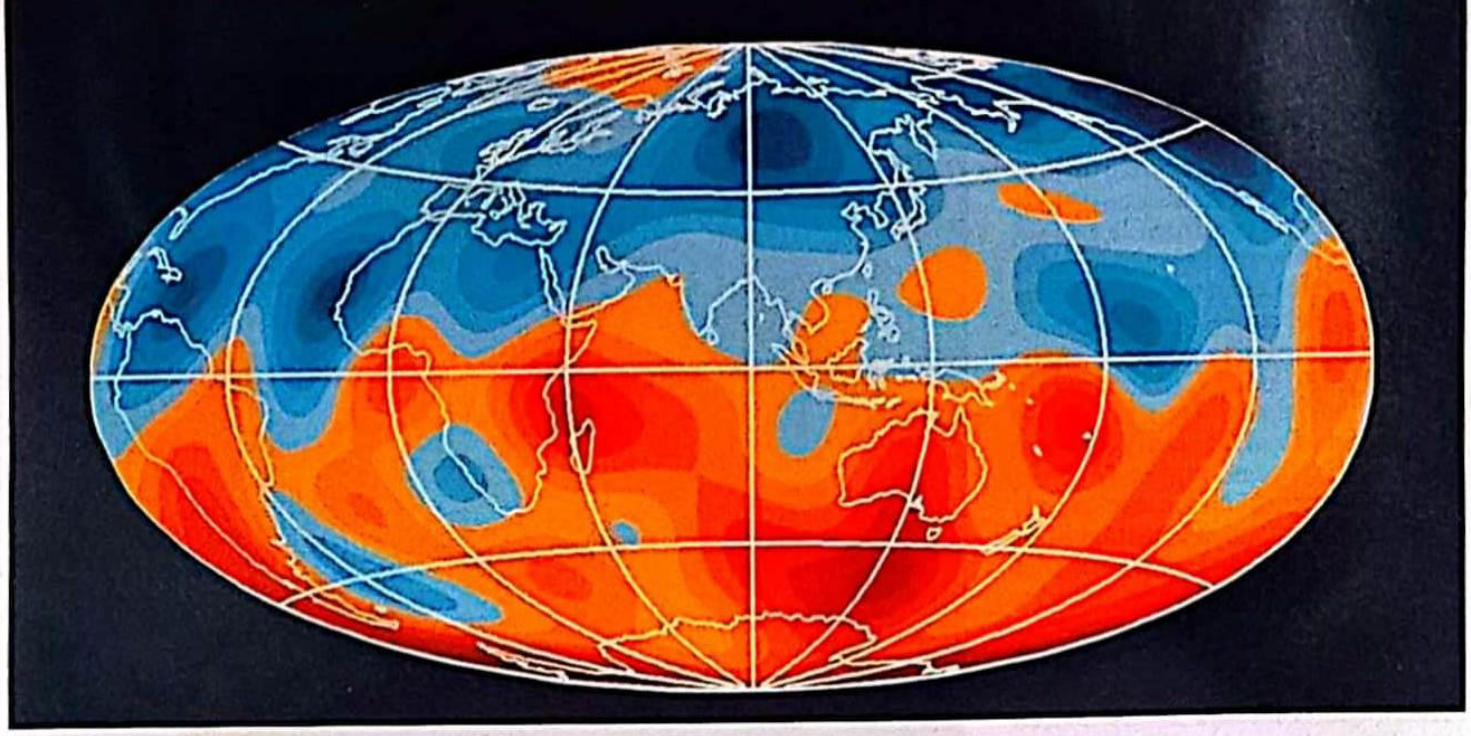
On connaît les principales caractéristiques de la géodynamo depuis les années 1950. La chaleur interne et la rotation du Globe font circuler le fer liquide dans le noyau externe. Lorsque le liquide conducteur traverse le champ magnétique terrestre, il s'accompagne d'un courant électrique, de la même façon qu'apparaît un courant électrique quand on déplace un fil conducteur dans un champ magnétique. Ce courant électrique induit crée un champ magnétique qui renforce le champ terrestre : la géodynamo s'auto-entretient : tant que la rotation et la chaleur de la Terre feront circuler un fluide conducteur autour du noyau, le courant électrique et le champ magnétique persisteront.

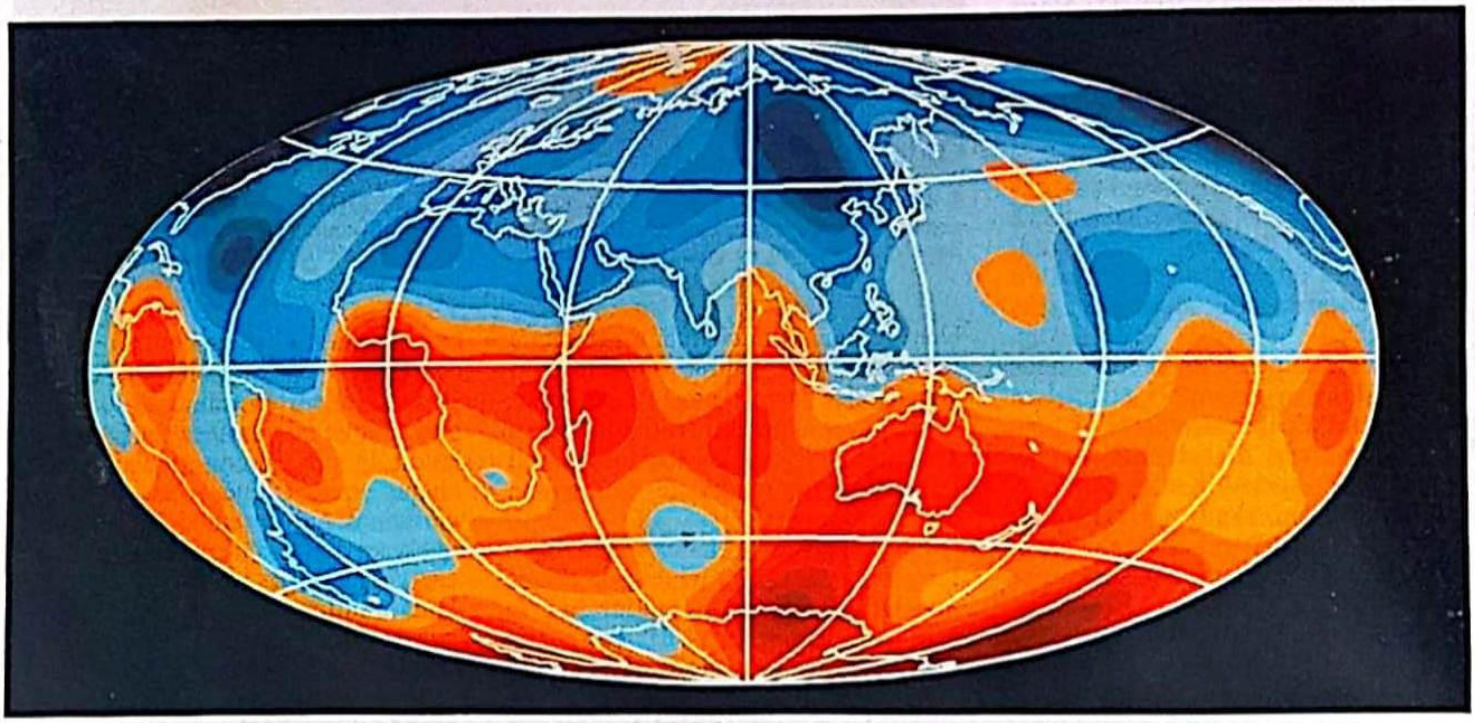
Ce modèle simple de géodynamo explique l'existence du champ magnétique, mais pas ses lentes variations. En dix ans par exemple, le champ s'affaiblit parfois de un pour cent et sa figure peut tourner de un degré. Tous les millions d'années environ, le champ s'inverse. Lors du dernier million d'années par exemple, le pôle Nord magnétique a migré de l'Antarctique vers l'Arctique (voir *Les inversions du champ magnétique terrestre*, par Kenneth Hoffman, *Pour la Science*, n° 129, juillet 1988). Bien que de nombreux aspects de ce phénomène

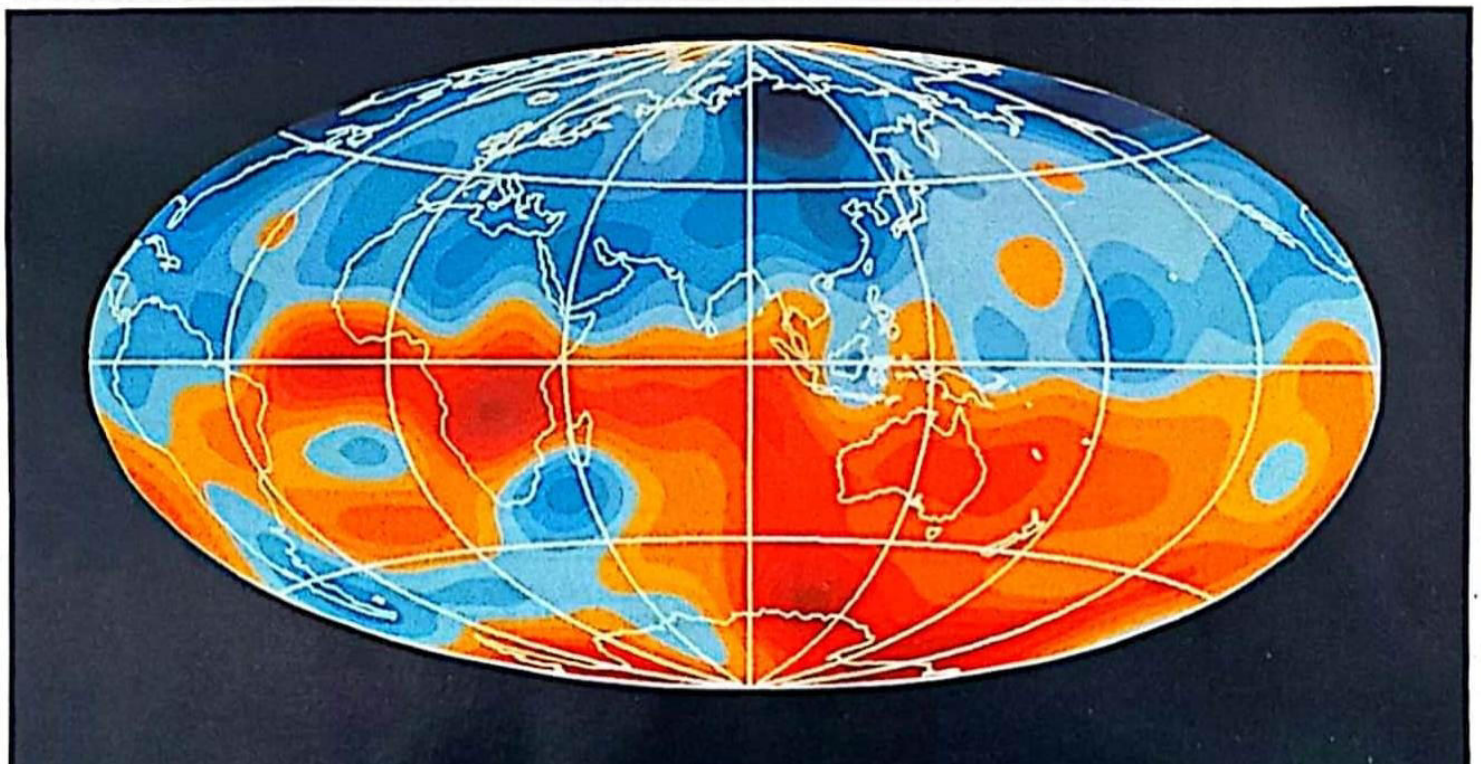


1. LE CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE mesuré en surface du Globe *(à droite)* est projeté à la surface du noyau ; les trois cartes ont été dressées à partir de mesures effectuées en 1777, 1882 et 1980 *(de haut en bas)*. Les intensités des couleurs correspondent aux intensités de flux magnétique normales à la surface du noyau ; elles correspondent au nombre de lignes de force du champ magnétique qui traversent cette surface *(en bleu, les flux entrants ; en rouge et en jaune, les flux sortants)*. Sur la figure ci-dessus on a indiqué le nom des principales structures magnétiques. Deux zones de flux intense, près du pôle Nord du noyau, et deux autres près du pôle Sud, sont restées immobiles au cours des deux derniers siècles. Dans l'hémisphère Sud, trois anomalies de flux inversé, accompagnées de zones de flux intense, ont dérivé vers l'Ouest et le Sud.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990







restent inexpliqués, les cartes du champ magnétique à la frontière du noyau et du manteau, portent des informations précieuses, à partir desquelles on élabore des théories de plus en plus précises concernant le géomagnétisme ; on espère également comprendre les champs magnétiques des autres planètes et du Soleil.

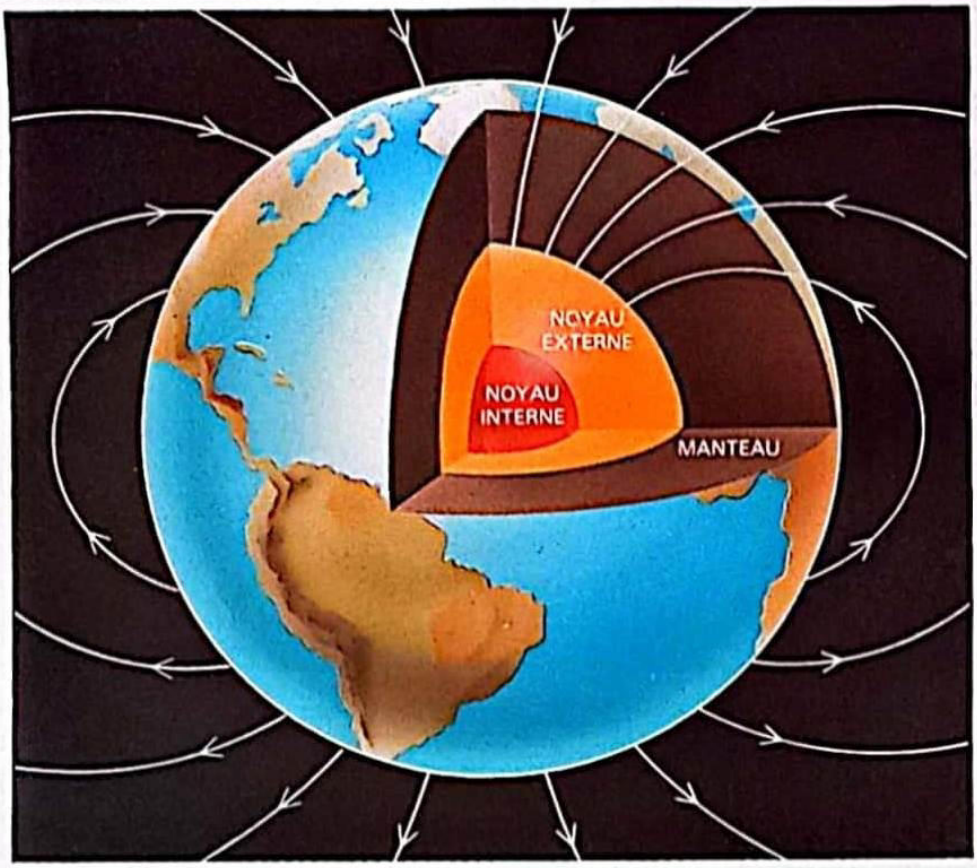
La dérive vers l'Ouest

Dans son *De Magnete*, publié en 1600, le physicien anglais William Gilbert suppose que la Terre est un gigantesque aimant (il distingue en outre l'électricité du magnétisme et crée le mot « électrique » du grec *electron*, qui signifie « ambre » : l'ambre frotté s'électrise). Un siècle plus tard, Edmund Halley sillonne l'Atlantique et mesure la déclinaison magnétique (l'angle entre le Nord géographique et le Nord magnétique).

Au cours des deux derniers siècles, on a amélioré la qualité et augmenté le nombre des mesures du champ magnétique, grâce à des observatoires répartis autour du Globe. Tous ces efforts ont culminé avec le lancement du satellite MAGSAT en 1980 : l'expérience, qui a duré un an, a fourni un grand nombre de données très précises.

La même année, l'un d'entre nous (D. Gubbins) a rassemblé et analysé divers types d'enregistrements historiques et actuels du champ magnétique ; peu après, Kathy Whaler, Ken Hutcheson, Andrew Jackson et J. Bloxham (le second auteur) se sont joints à lui. Au cours de la première étape du projet, nous avons dressé des cartes du champ magnétique, à la surface de la Terre pour les 380 dernières années.

Ces cartes illustrent des propriétés

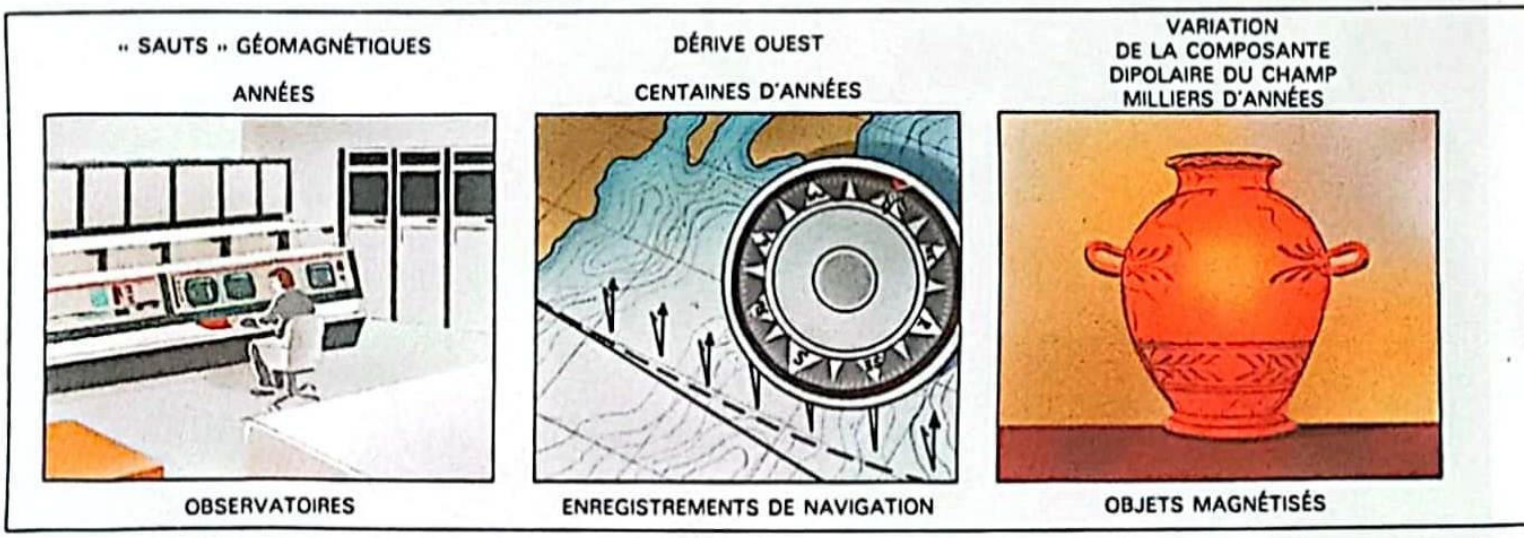


2. LES LIGNES DE FORCE DU CHAMP MAGNÉTIQUE indiquent la structure du champ à l'extérieur du noyau *(à gauche)*. En chaque point, le champ est tangent à la ligne qui passe en ce point ; la densité des lignes indique l'intensité du champ. À partir

bien connues du champ magnétique terrestre ; il ressemble à celui d'un gigantesque barreau aimanté qui serait aligné avec l'axe de rotation de la Terre et il possède deux pôles où l'intensité est maximale : c'est un champ dipolaire.

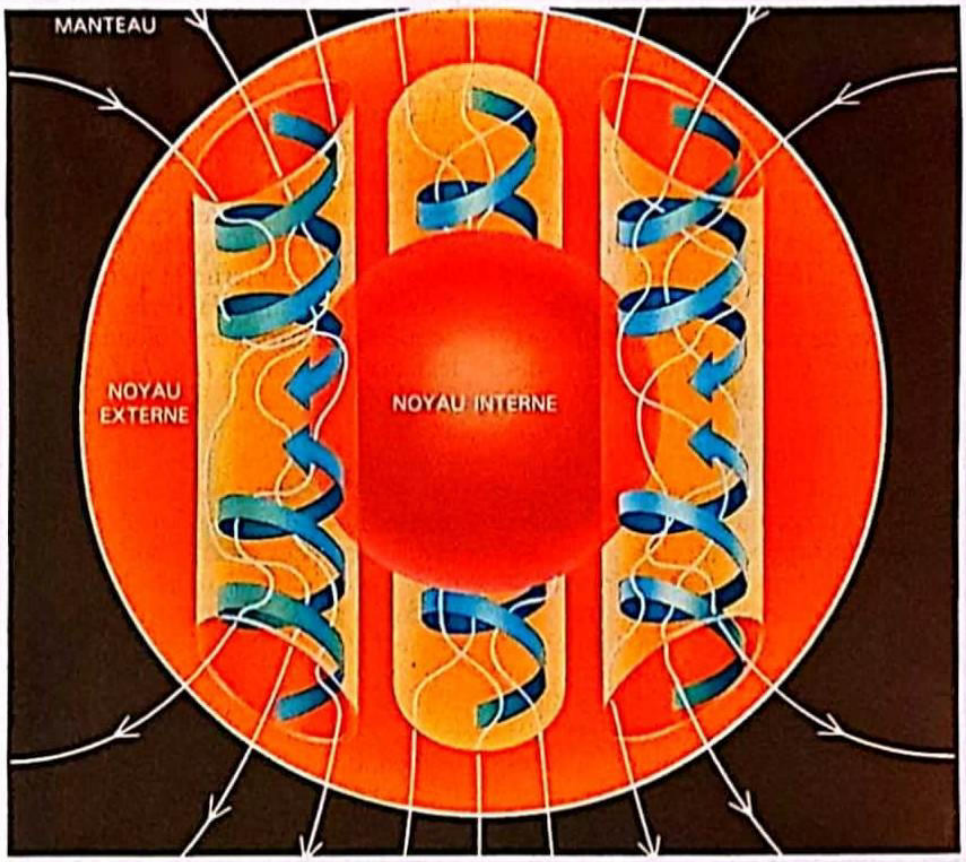
On représente le champ magnétique terrestre par des lignes de force magnétique qui sortent autour du pôle Sud et rentrent dans la Terre aux environs du pôle Nord. Les forces magnétiques qui s'exercent sur des particules aimantées sont tangentes à ces lignes de champ, dont la densité correspond à l'intensité du champ.

Avec les cartes indiquant le champ magnétique à la surface du Globe, on étudie la « variation séculaire » du champ magnétique, c'est-à-dire les variations qui durent de la dizaine à quelques dizaines de milliers d'années. Les variations les plus étonnantes sont la diminution de la composante dipolaire du champ magnétique et la dérive vers l'Ouest de ses structures. La composante dipolaire était bien plus grande il y a 2000 ans qu'aujourd'hui



3. LES DIVERS TYPES DE VARIATIONS du champ magnétique terrestre sont caractérisés par l'ordre de grandeur de leur durée. On les étudie par les méthodes indiquées dans la partie inférieure de la figure. Comme le manteau filtre les signaux

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990



de cartes du champ magnétique projetées sur la surface du noyau, les auteurs ont déduit les configurations possibles des courants de fluide et du champ magnétique à l'intérieur du noyau *(à droite)*.

(les particules de fer des céramiques romaines sont beaucoup plus aimantées que celles des poteries modernes) ; si le même affaiblissement se prolonge encore, la composante dipolaire du champ s'annulera avant les prochains 2000 ans. Halley avait observé la dérive vers l'Ouest du champ magnétique, dans l'océan Atlantique ; la ligne de déclinaison magnétique nulle (le long de laquelle l'aiguille de la boussole pointe vers le Nord géographique) s'est régulièrement déplacée vers l'Ouest en plusieurs siècles.

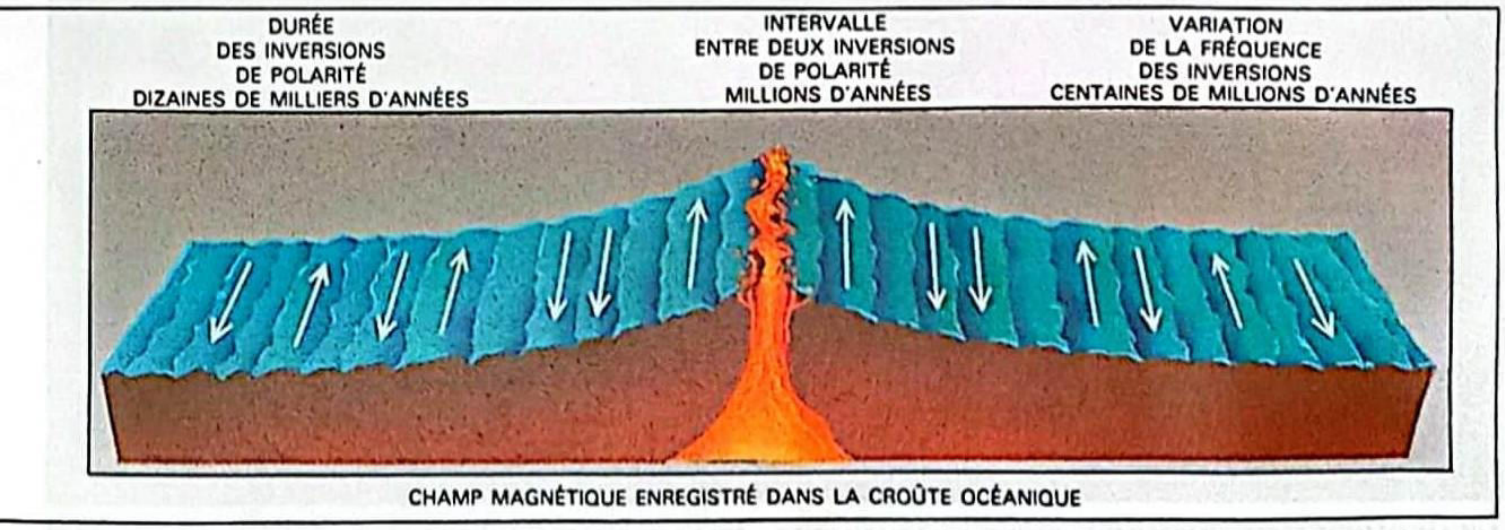
Une carte à la surface du noyau

Pour comprendre l'origine de l'affaiblissement du champ magnétique et de la dérive vers l'Ouest, on a besoin d'une image du champ magnétique au plus près de sa source : le noyau externe. Le fer en fusion, conducteur, masque le champ magnétique qui règne à l'intérieur du noyau, mais on peut déterminer le champ à la limite du noyau et du manteau.

À l'aide de méthodes mathématiques, inventées au début du XIX^{e} siècle, on savait théoriquement calculer le champ magnétique à la surface du noyau à partir du champ mesuré à la surface du Globe. Ces méthodes de projection ne sont devenues fiables que depuis ces dernières années. La difficulté ne provient pas d'un phénomène physique inconnu : la croûte et le manteau conduisent très peu l'électricité et, par conséquent, ils n'engendrent qu'un très faible champ magnétique et ne masquent que peu le champ interne ; en revanche, les projections amplifient les petites structures du champ magnétique mesurées en surface : de faibles fluctuations conduisent à des anomalies magnétiques considérables, dont l'existence réelle est douteuse. Avec Robert Parker, George Backus et Loren Shure, de l'Institut océanographique *Scripps*, nous avons conçu une méthode mathématique pour élaborer une carte au noyau aussi simple que possible. En 1983, nous avons d'abord appliqué cette méthode en utilisant des données récentes, qui présentent moins de difficultés, puis nous avons dressé une série de cartes du champ magnétique, à partir de toutes les données recueillies pendant les 380 années passées.

Ces cartes indiquent, en chaque point du Globe, le nombre de lignes de force qui traversent la surface du noyau par unité de surface (le flux magnétique). Les parties colorées en bleu correspondent à un flux entrant, les parties rouges à un flux sortant ; l'intensité des couleurs est proportionnelle au flux magnétique.

Si le champ magnétique à la surface du noyau était celui d'un simple dipôle aligné avec l'axe de rotation de la Terre, l'intensité des couleurs croîtrait de l'équateur aux pôles ; le flux serait maximal aux pôles géographiques, et la limite entre les zones bleue et rouge



provenant du noyau externe, on ne peut observer les variations de période inférieure à un an. Pour des temps supérieurs, on observe parfois un saut de variation séculaire, un changement soudain dans l'accélération de l'évolution des structures magnétiques.

serait exactement à l'équateur : l'équateur magnétique correspondrait à l'équateur géographique (l'équateur magnétique est la ligne le long de laquelle le champ magnétique est horizontal ; c'est une courbe de flux nul, car aucune ligne de force du champ magnétique n'entre ni ne sort d'un point quelconque de cette ligne).

Les mesures effectuées par le satellite MAGSAT, en 1980, ont montré que le champ géomagnétique, à la surface du noyau, était comparable à un champ dipolaire : sur la carte, l'hémisphère Nord est presque entièrement bleu, l'hémisphère Sud est presque entièrement rouge, et l'équateur magnétique est très proche de l'équateur géographique.

Ce champ diffère cependant d'un champ dipolaire. La carte établie en 1980 comporte sept lignes de flux nul, en plus de celle de l'équateur magnétique, qui limitent des zones bleues et rouges (des zones de flux entrant et sortant). En outre, une plage bleu sombre, située sous l'océan Atlantique Sud, correspond à un flux entrant intense : c'est un exemple de flux inversé ; on en connaît plusieurs.

Pourquoi observe-t-on ces anomalies ? Leur origine semble liée à celle de la composante dipolaire du champ magnétique terrestre, de l'affaiblissement du champ dipolaire et de la variation séculaire (notamment la dérive vers l'Ouest). En étudiant ces problèmes, on commence à imaginer une nouvelle théorie de la géodynamo à partir des structures magnétiques à la surface du noyau.

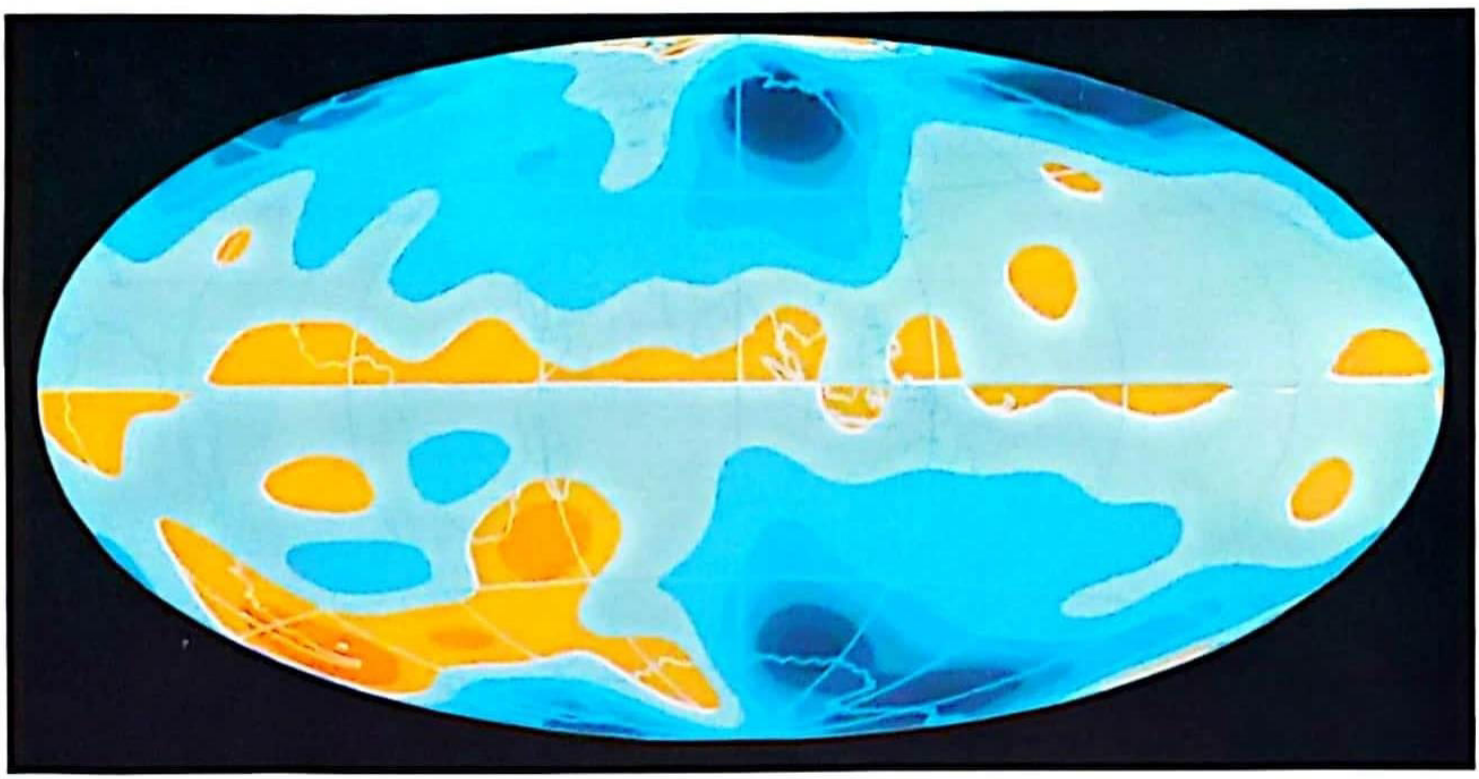
Deux colonnes de fluide

Nous avons découvert que la structure dipolaire provient surtout de quatre régions de la surface du noyau *(voir la figure 4)*, symétriquement disposées de part et d'autre de l'équateur (elles sont à l'intersection des parallèles de latitude 60 degrés Nord et 60 degrés Sud, et des méridiens de longitude 120 degrés Est et 120 degrés Ouest). Comme ces zones se sont peu déplacées au cours des quatre derniers siècles, on suppose qu'elles jouent un rôle à long terme dans la formation du champ magnétique terrestre.

Ces zones sont à proximité de régions polaires de faible flux, qui contribuent donc peu au champ dipolaire. Notons que ces régions polaires ont un diamètre comparable à celui du noyau interne. Cette observation correspond à une prévision effectuée par Friedrich Busse et ses collègues de l'Université de Los Angeles, qui ont construit, en 1973, un modèle constitué d'une petite sphère tournant à l'intérieur d'une grande sphère, emplie d'eau : la vitesse du fluide était minimale au-dessus et au-dessous des pôles de rotation de la sphère interne. Si le même phénomène se produit dans le noyau externe, le champ magnétique doit également être plus faible près des pôles. À l'aide des résultats de Fr. Busse, nous avons recherché les principales caractéristiques de l'écoulement dans le noyau terrestre. Nous pensons que les quatre zones qui contribuent le plus au champ magnétique dipolaire sont les extrémités de deux colonnes de liquide en contact avec le noyau interne et parallèles à l'axe de rotation de la Terre ; il existe peut-être une troisième colonne parallèle aux deux autres *(voir la figure 4)*. On suppose que le fer en fusion se déplace hélicoïdalement dans les colonnes et que les lignes de champ magnétique induit sont canalisées par ces colonnes. Si cette hypothèse est vérifiée, on peut directement déterminer l'écoulement dans le noyau externe à partir du champ magnétique en surface.

Des vagues de fer liquide

Bien qu'intéressante, cette théorie n'est pas complète : elle ne rend pas compte de la variation séculaire et, notamment, de la dérive vers l'Ouest. Dans les 40 dernières années, deux explications principales ont été proposées. La première fut celle d'Edward Bullard et de ses collègues de l'Université de Cambridge : en 1950, ils ont supposé que des forces électromagnétiques font tourner le noyau vers l'Ouest par rapport au manteau et à la croûte. La seconde explication est due à Raymond Hide, du Bureau



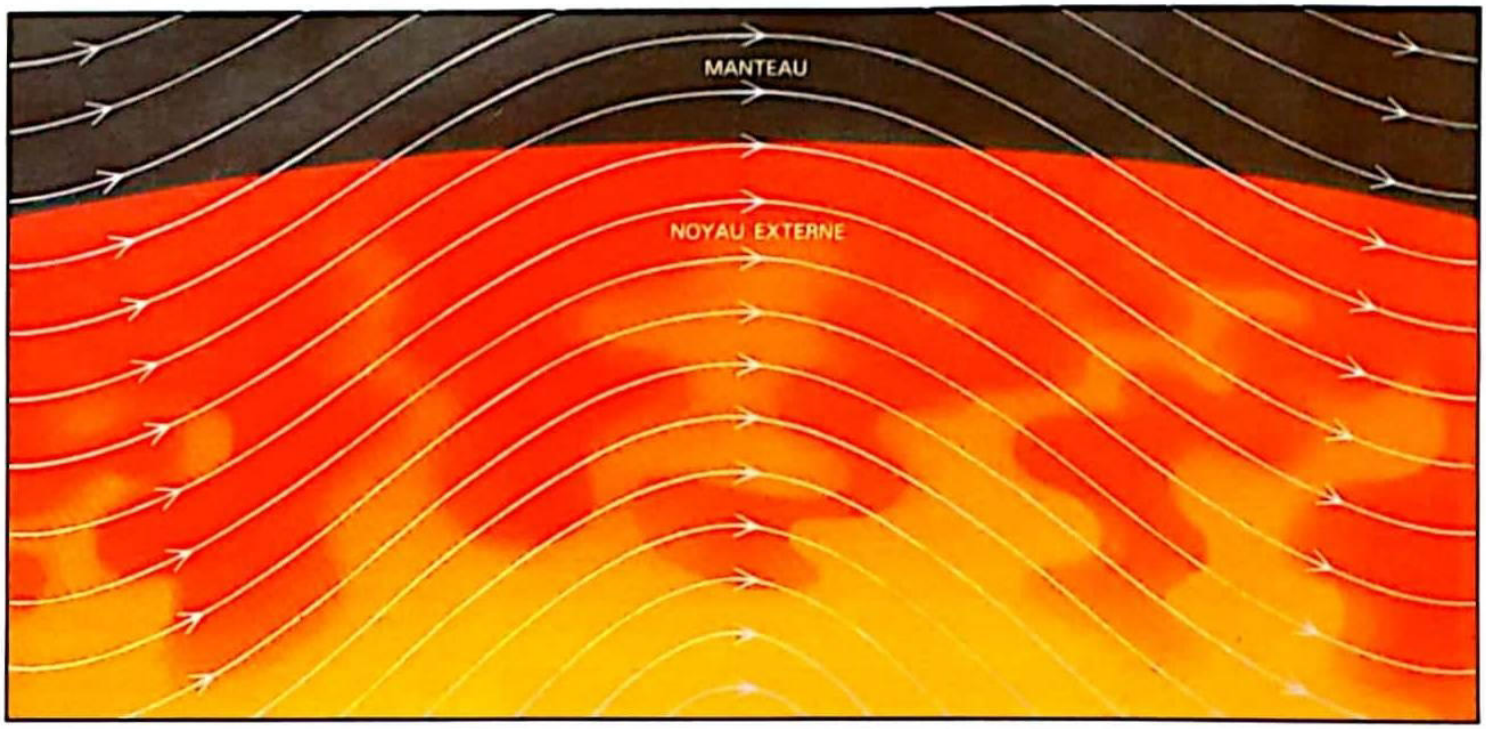
4. LA COMPOSANTE DIPOLAIRE du champ magnétique, à la surface du noyau, est plus intense dans les régions bleu sombre. Dans l'hémisphère Nord, les flux entrants augmentent le champ dipolaire ; dans l'hémisphère Sud, ce sont les flux sortants. Si la Terre était un dipôle parfait, les cartes seraient bleu sombre aux pôles et s'éclairciraient progressivement vers l'équateur.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

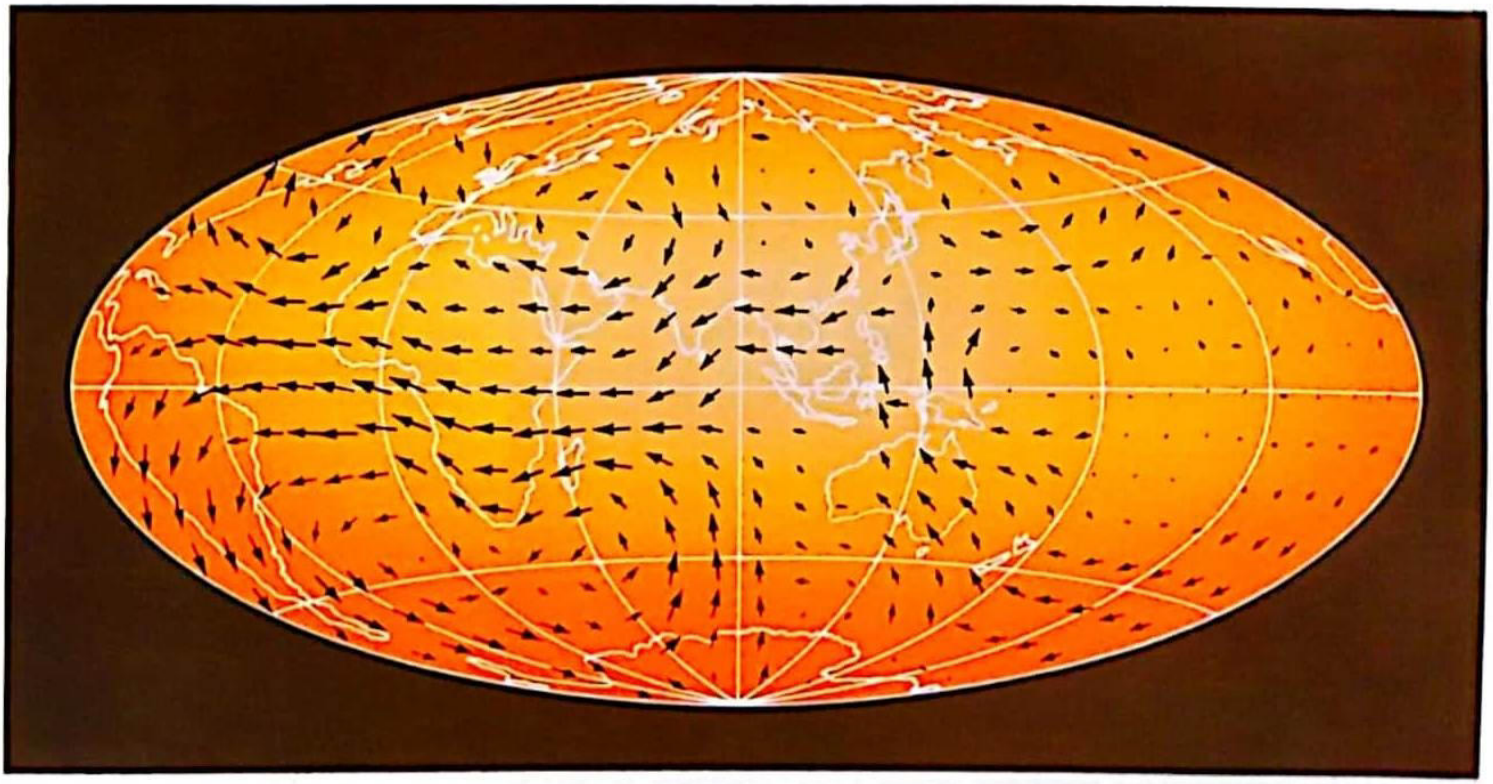
britannique de météorologie : il a supposé que la dérive vers l'Ouest résulte de la propagation d'ondes dans le noyau. Cette hypothese explique la dérive, même si le fluide du noyau ne tourne pas par rapport au manteau : des mouvements ascendants ou descendants du fluide peuvent engendrer des ondes, tout comme les vibrations d'une corde engendrent des ondes qui se propagent le long de celle-ci.

Les cartes du champ magnétique à la surface du noyau semblent en contradiction totale avec l'hypothèse de E. Bullard, et en contradiction partielle avec celle de R. Hide. Si le noyau tourne par rapport au reste du Globe, la dérive doit être présente sur tout le Globe ; or les mesures historiques du champ magnétique n'indiquent de dérive que sous l'hémisphère Atlantique (de 90 degré de longitude Ouest à 90 degré de longitude Est). Dans cette zone, des anomalies se déplacent à environ dix kilomètres par an. Pourquoi des ondes de fer liquide ne se propagent-elles pas aussi sous l'hémisphère Pacifique ?

Pour comprendre les forces respon-



5. LES MONTÉES de fer en fusion déforment les lignes de champ contre la surface du noyau. Les lignes pénètrent dans le manteau par diffusion, de sorte que des zones de flux sortant *(partie gauche)* et de flux entrant *(partie droite)* apparaissent.



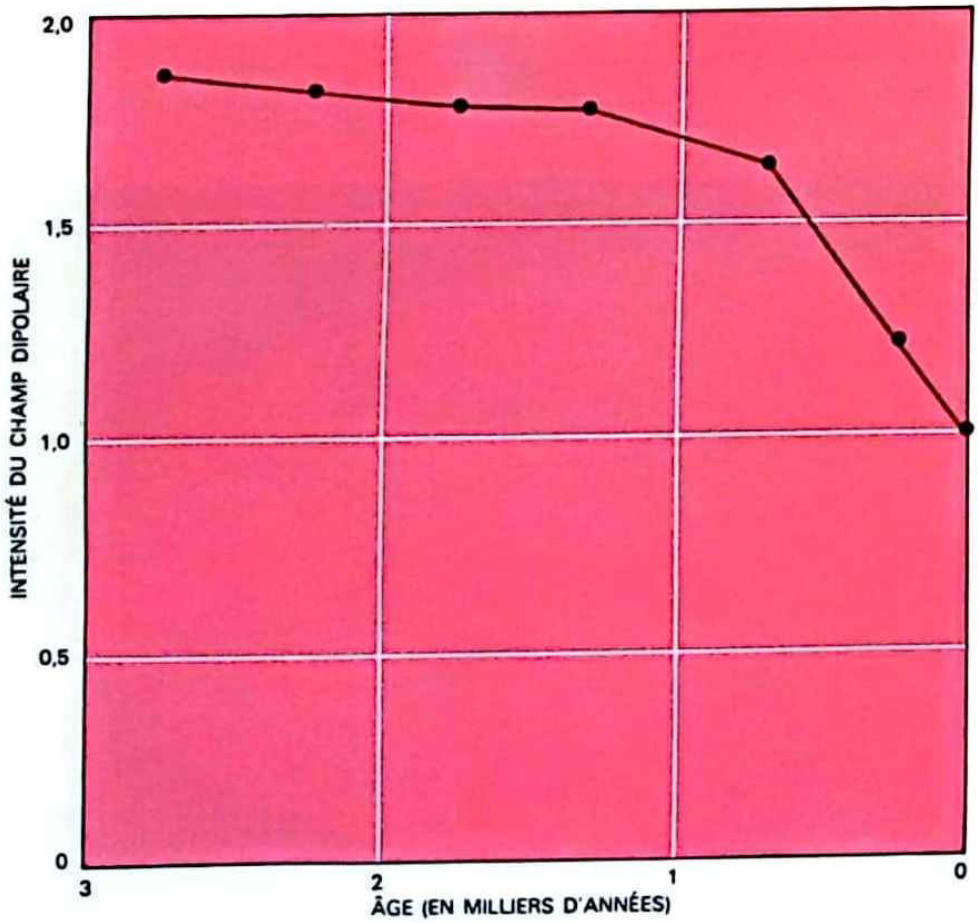
6. LE FER EN FUSION s'écoule rapidement dans deux régions à la surface du noyau : sous l'Europe et sous la pointe de l'Afrique *(les flèches indiquent la direction et la vitesse des fluides)*. Ces deux courants pourraient provoquer la dérive du champ magnétique vers l'Ouest. La structure des courants est compatible avec l'existence d'un noyau interne et avec la rotation de la Terre.

sables de la dérive vers l'Ouest et, plus généralement, la variation séculaire, nous avons recherché la direction de l'écoulement du fluide dans le noyau externe, à partir du mouvement des structures magnétiques à sa surface. Les lignes de champ magnétique sont « figées » dans le fer liquide du noyau et se déplacent avec lui. Si l'on pouvait suivre une ligne de champ, on pourrait calculer le déplacement d'une particule de fluide à la surface du noyau.

En 1965, Paul Roberts et S. Scott, de l'Université de Newcastle-sur-Tyne, ont proposé une méthode afin de déterminer directement les courants dans les noyaux à partir des mesures de champ magnétique en surface. Par cette méthode, E. Vestine et ses collègues de la Société *Rand* ont rapidement dressé les premières cartes de l'écoulement à la surface du noyau. Cependant P. Roberts avait compris que sa méthode était imparfaite, car dans la plupart des cas, on ne peut individualiser les lignes de force d'un champ magnétique ; on ne distingue notamment pas ces lignes dans les champs homogènes, et l'on ne peut pas calculer leurs positions successives. En 1968, G. Backus étudia ce problème en s'intéressant aux lignes de flux nul : on peut suivre le déplacement de ces lignes, et déterminer les mouvements de fluide qui leur sont perpendiculaires.

D'autres géophysiciens ont récemment découvert des situations où l'on peut calculer la vitesse du fluide. Coerte Voorhies, du Centre spatial Goddard de la NASA, a montré que l'on peut repérer un courant s'il reste constant suffisamment longtemps. Jean-Louis Le Mouël et ses collègues de l'Institut de physique du Globe de Paris ont démontré qu'il était possible de calculer un écoulement s'il est caractérisé par un équilibre entre des forces de rotation et des forces de pression. K. Whaler et David Lloyd, de l'Université de Cambridge, ont découvert que l'on peut détecter les courants près de la surface du noyau, dans les régions où il n'y a pas de mouvements ascendants et descendants. Aujourd'hui les géophysiciens essaient d'exploiter toutes ces hypothèses.

Par ce type de méthodes, nous avons déterminé les courants à la surface du noyau. L'hémisphère Atlantique est parcouru par deux courants importants, de part et d'autre de l'équateur ; près de celui-ci, les deux courants s'écoulent vers l'Ouest. La dérive du champ magnétique, observée dans les enregistrements historiques, à la surface du Globe, semble ainsi due à un grand courant, à la surface du noyau.



7. L'INTENSITÉ DU DIPÔLE magnétique terrestre a décru rapidement au cours du dernier millénaire. Ce graphique représente l'intensité relative de la composante dipolaire par rapport à sa valeur en 1980. Michael McElhinny et W. Senanyake ont établi cette courbe d'après des données historiques et archéologiques.

Les taches du noyau

Si les caractéristiques du champ magnétique à la surface du Globe révèlent les courants dans le noyau externe, ils n'en expliquent pas l'origine. E. Bullard proposa une explication en 1958 *(voir la figure 5)* : le champ magnétique sort du noyau et y rentre quand le fer en fusion s'élève vers la surface du noyau ; de part et d'autre de celle-ci, le flux magnétique est intense, soit entrant, soit sortant : une « tache du noyau » apparaît, avec une structure magnétique analogue à celle des taches solaires. Nos cartes du noyau confortent l'hypothèse de E. Bullard : le mécanisme explique bien la formation et le mouvement des taches.

Comme certaines structures magnétiques se forment et se déplacent rapidement, tandis que d'autres restent immobiles, un autre phénomène doit intervenir. En 1967, R. Hide a imaginé que la surface du noyau n'était pas parfaitement sphérique et que, par endroit, le manteau s'enfonçait dans le noyau ; des « montagnes inverses » perturberaient l'écoulement du fluide à la surface du noyau, agissant sur le champ magnétique comme les montagnes à la surface de la Terre agissent sur les conditions météorologiques.

La convection dans le manteau pourrait également engendrer des irrégularités thermiques à la surface du noyau, qui perturberaient l'écoulement du fer et la répartition du champ magnétique. En effet, Adam Dziewonski et John Woodhouse, de l'Université Harvard, ainsi que Robert Clayton et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie ont dressé une carte des températures dans le manteau inférieur : nous y avons trouvé des correspondances surprenantes avec nos cartes magnétiques du noyau. Trois des quatre zones qui contribuent fortement au champ dipolaire sont situées sous des régions « froides » du manteau : la géodynamo est-elle solidaire du manteau ? Des taches du noyau se forment sous l'Afrique du Sud, dans une région où le manteau est chaud et favoriserait l'ascension du liquide du noyau ; sous l'océan Pacifique, des zones de faible flux sont situées elles aussi sous une

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

région chaude du manteau ; les lignes de champ magnétique sont-elles repoussées de cette région parce que peu de liquide monte à cet endroit dans le noyau ? L'anneau froid qui entoure l'océan Pacifique correspond peut-être à l'absence de structures magnétiques.

Un phénomène oscillatoire

On découvre aujourd'hui que l'affaiblissement actuel de la composante dipolaire du champ magnétique terrestre provient probablement de la croissance et de la propagation des structures magnétiques de flux inversé sous l'Afrique et sous l'océan Atlantique. La tache africaine grossit et la tache atlantique se déplace vers le Sud.

La tache au centre de l'Atlantique est déjà présente sur notre première carte du champ magnétique, pour la période de 1650. Depuis cette époque, elle s'est déplacé vers l'Ouest, puis de plus en plus vers le Sud, à la vitesse de 0,1 degré de longitude par an. La tache située sous l'Afrique s'est peut-être formée sous l'Indonésie à la fin du XVIII^{e} siècle, mais elle est restée d'importance secondaire jusqu'au XX^{e} siècle ; elle s'est alors déplacée rapidement vers l'Ouest, à une vitesse de 0,3 degré de longitude par an.

Les enregistrements magnétiques couvrent une trop petite période pour que l'on puisse étudier convenablement un cycle de ces anomalies de flux, mais nous avons essayé de reconstituer les mouvements des taches : nous supposons qu'elles se forment sous l'Indonésie et qu'elles se déplacent rapidement vers l'Ouest ; lorsqu'elles atteindraient l'Afrique, elles s'intensifieraient ; puis elles traverseraient l'océan Atlantique, à la vitesse de 0,1 degré de longitude par an et dévieraient vers le Sud. La tache atlantique actuelle se serait ainsi formée il y a 900 ans et la tache africaine, il y a 200 ans. Cette théorie est encore très spéculative, mais elle explique la lente décroissance de la composante dipolaire du champ. Lors de leur mouvement vers le Sud, les structures magnétiques à flux inversé affaiblissent le champ dipolaire. Si une nouvelle anomalie apparaît et dérive vers l'Ouest, elle pourrait encore réduire la composante de champ dipolaire et provoquer une inversion du champ magnétique terrestre.

Les enregistrements historiques révèlent des formations et des croissances d'anomalie à flux inversé, mais pas de disparition. Cependant ces anomalies doivent décroître lors des intensifications du champ dipolaire. Au cours des dix derniers millions d'années, la polarité du champ magnétique terrestre s'est inversée environ tous les 500 000 ans. Or le champ dipolaire décroît pendant une période bien plus courte, et il ne s'est pas inversé à chaque fois qu'il a diminué ; souvent un champ de même polarité que celle qui régnait reste établi.

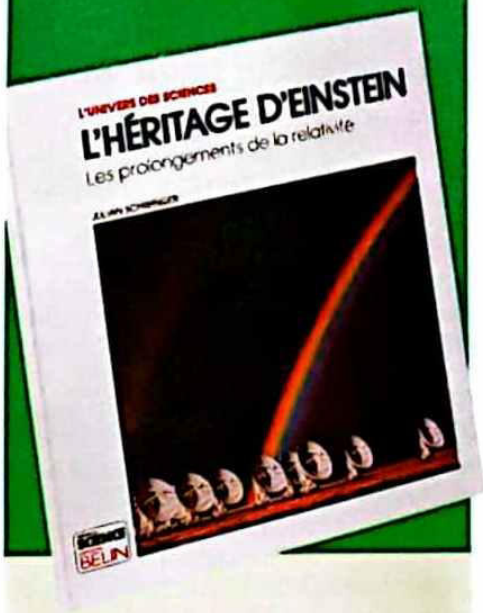
Allan Cox, de l'Université Stanford, a proposé une explication du mécanisme aléatoire des inversions du champ magnétique : l'intensité de la composante dipolaire oscillerait et ces oscillations seraient parfois si fortes qu'elles inverseraient le champ magnétique. Nous approuvons ce modèle et pensons en outre que les oscillations résultent du mouvement des taches du noyau.

Cependant la formation des taches n'explique pas pourquoi les intervalles de temps entre les inversions diffèrent au cours des temps géologiques. Au Crétacé, il y a environ 90 millions d'années, et au Permien, il y a environ 170 millions d'années, de très longues périodes se sont écoulées sans aucune inversion du champ magnétique : les roches ont conservé la même polarité. En revanche, les inversions ont crû régulièrement dans les 90 derniers millions d'années. Les structures du noyau évoluent trop rapidement pour être responsables de ces phénomènes, et l'on suppose plutôt qu'ils résultent de changements dans le manteau, qui ont une période de 100 millions d'années. Un réchauffement du manteau profond, en particulier sous l'Afrique du Sud ou l'Indonésie, pourrait accélérer la formation d'anomalies magnétiques et, par conséquent, provoquer des inversions de champ.

Les géophysiciens peuvent aujourd'hui élaborer des théories détaillées du géomagnétisme et ils progresseront, naturellement, s'ils obtiennent des mesures régulières du champ magnétique terrestre. Les données recueillies par MAGSAT ont considérablement fait progresser notre connaissance du noyau, mais malgré le plein succès de cette mission, aucun nouveau projet n'a été décidé. Les contraintes financières menacent même de fermeture certains importants observatoires magnétiques. Paradoxalement on effectue moins de mesures aujourd'hui qu'il y a 25 ans.

Les campagnes de mesure magnétique nous semblent prioritaires ; chaque pays devrait poursuivre le subventionnement de ses observatoires magnétiques et participer à de nouvelles missions dans l'espace. Supporterions-nous de manquer la formation d'une nouvelle tempête magnétique ou d'une tache du noyau ? ■

L'UNIVERS DES SCIENCES



L'HÉRITAGE D'EINSTEIN

Dans ce livre, Julian Schwinger retrace la captivante histoire d'une des plus belles idées du XX^{e} siècle, la théorie de la relativité, associée au génie d'Albert Einstein. Exposé historique, exposé humain, récit poétique et illustrations expérimentales des développements de la relativité, tout converge pour faire partager aux lecteurs la fascination des relations entre l'espace et le temps.

POUR LA SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande page 98 A

Les téléopérateurs

WILLIAM UTTAL

Ces machines télécommandées travaillent dans des environnements peu accessibles ou hostiles.

Comment travailler en toute sécurité dans un environnement dangereux comme le cœur d'un réacteur nucléaire, un champ de bataille ou le fond d'un océan ? Un jour peut-être, on fabriquera des robots complètement autonomes, mais aujourd'hui on utilise des téléopérateurs, c'est-à-dire des machines mobiles, commandées à distance par un homme. Avec ces machines, l'opérateur peut se fonder sur ses sensations et faire preuve de son jugement afin de guider habilement la machine, mais il reste en un lieu sûr.

Que le téléopérateur fonctionne dans une pièce voisine de l'opérateur ou sur une autre planète, il a toujours la même fonction : il allonge la portée des outils employés. Les téléopérateurs ne sont pas des robots, car leur intelligence, leurs perceptions et leur habileté motrice sont d'origine humaine et non gérées par un ordinateur. La téléopération, ou la transmission d'informations et de commandes entre deux sites est un processus de communication : l'opérateur humain doit être constamment présent pour manipuler à distance les outils de travail.

La commande par un être humain est un avantage considérable. Pendant les 30 dernières années, on a souvent cru, avec optimisme, que l'on pourrait utiliser des robots, autonomes et commandés par des ordinateurs, afin d'effectuer des tâches dans des sites dangereux ou inaccessibles à l'Homme. Les difficultés techniques ont progressivement éteint ces espoirs : les problèmes d'intelligence artificielle se sont notamment révélés plus difficiles que prévus. Certains obstacles à l'automatisation complète seront surmontés par des progrès techniques, mais d'autres semblent plus fondamentaux.

Heureusement une autonomie complète n'est pas toujours indispensable, et les téléopérateurs ont déjà rendu d'immenses services, comme par exemple dans l'exploration récente de l'épave du *Titanic*. Plusieurs laboratoires dans le monde essaient de développer les capacités de ces machines. Ils étudient principalement des liaisons puissantes et flexibles entre l'opérateur et la machine, en tenant compte des capacités perceptives, intellectuelles et motrices des opérateurs, et des contraintes techniques.

Un problème de communication

Tous les téléopérateurs ont en commun des capteurs qui perçoivent l'environnement de travail, un système de visualisation qui montre cet environnement à l'opérateur, des systèmes de commande avec lesquels l'opérateur indique ses décisions, des outils de travail sur le site et, surtout, un système de communication qui transmet l'information des capteurs au système de visualisation, et des commandes aux outils. Chaque téléopérateur comporte en outre le « nécessaire de base » avec lequel il se déplace pendant le travail et procure de l'énergie à ses outils.

Les premiers véritables téléopérateurs mis au point dans les années 1940 servaient à manipuler des matériaux radioactifs. Le système de visualisation était une simple fenêtre ; l'opérateur commandait directement les outils – des crochets et des pinces – par un système de connexion mécanique formé de tiges et de câbles rigides ou flexibles. Dans les téléopérateurs modernes, les liaisons sont souvent indirectes : des signaux sont transmis par des fils électriques, des fibres optiques ou même, des ondes radio ; des vérins hydrauliques sont également utilisables quand l'opérateur n'est pas très éloigné de la machine télécommandée. Quelle que soit la technique utilisée ou la distance homme-machine, les éléments de communication conservent la même fonction : ils doivent indiquer à l'opérateur l'état des outils et l'environnement, et ils doivent transmettre à la machine les signaux de commande qui permettent de reproduire les mouvements de l'opérateur.

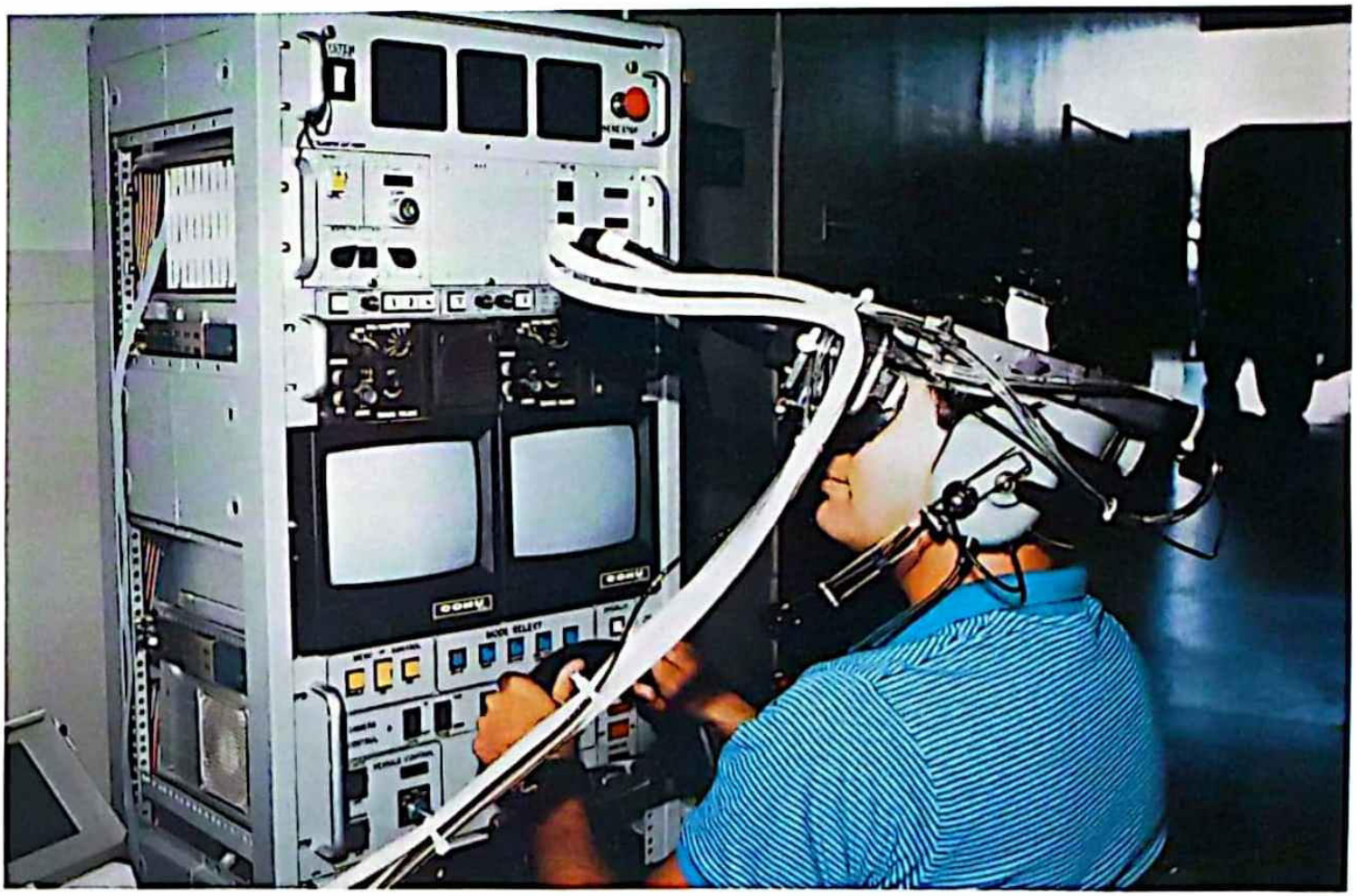
Grâce au système de visualisation qui affiche l'environnement éloigné, l'opérateur humain peut se sentir plongé dans l'environnement de travail où évolue le téléopérateur. On ignore jusqu'à quel point cette impression améliore l'efficacité de la commande et quelle est la meilleure façon de la créer ; de toute façon, on ne cherche pas à retransmettre toutes les caractéristiques du site de travail : la chaleur ou la radioactivité sont nettement superflues !

En revanche, une information insuffisante sur l'environnement de travail nuit probablement aux performances. On a donc beaucoup étudié, notamment, le champ visuel optimal que devait couvrir le système de visualisation : de ce champ dépend la vitesse apparente des objets visibles sur les systèmes d'affichage. Le choix des stimuli visuels communiqués à l'opérateur et la forme sous laquelle ils sont transmis sont des thèmes de recherche fondamentaux en téléopération.

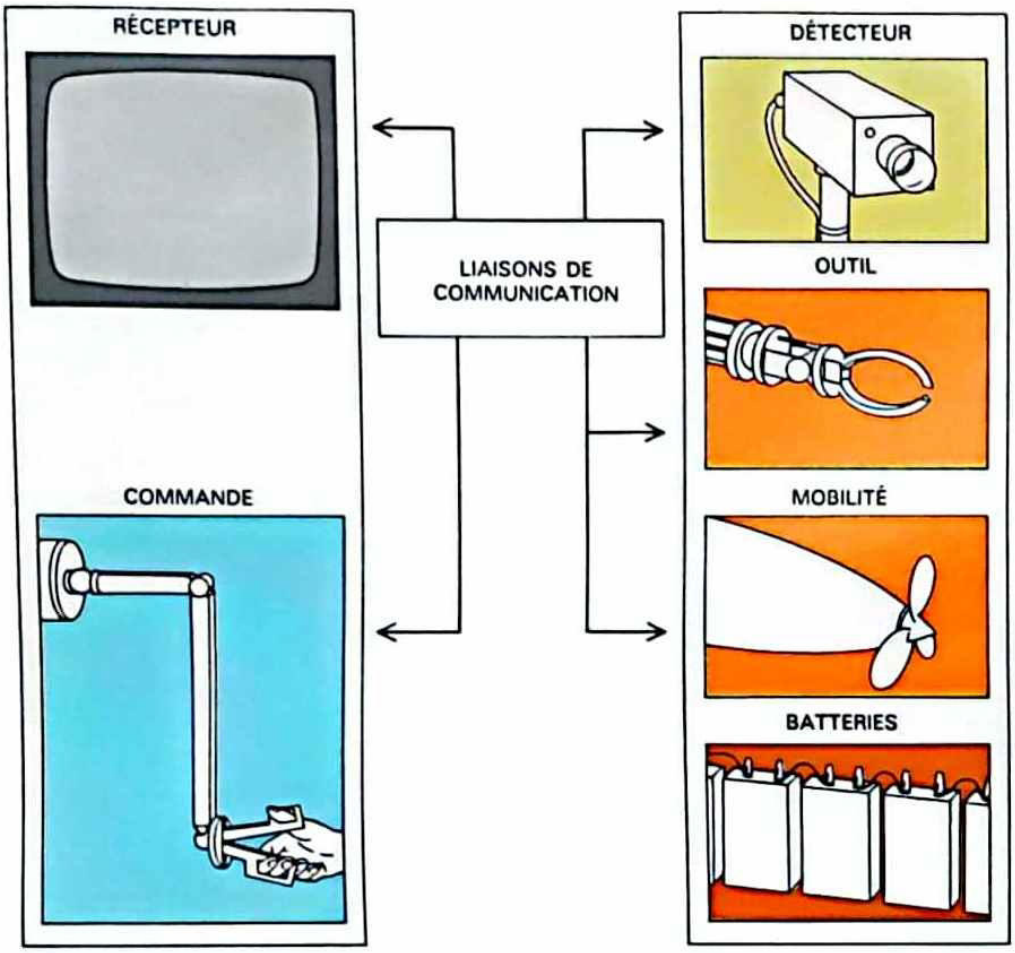
Dans plusieurs téléopérateurs mis au point au Centre de systèmes navals d'Hawaii (NOSC), l'affichage est stéréoscopique : deux caméras disposées comme deux yeux, sur les téléopérateurs, reproduisent le relief et donnent l'impression que l'opérateur est sur le site de travail. La distance optimale entre les deux caméras n'est pas nécessairement celle des yeux : en écartant les caméras, on peut considérablement augmenter la profondeur de champ ; cependant Edward Spain a découvert que lorsque l'on augmente trop cette distance, l'opérateur estime moins bien la profondeur de champ.

Les caméras sensibles à des rayonnements invisibles augmentent les possibilités de l'opérateur : celui-ci

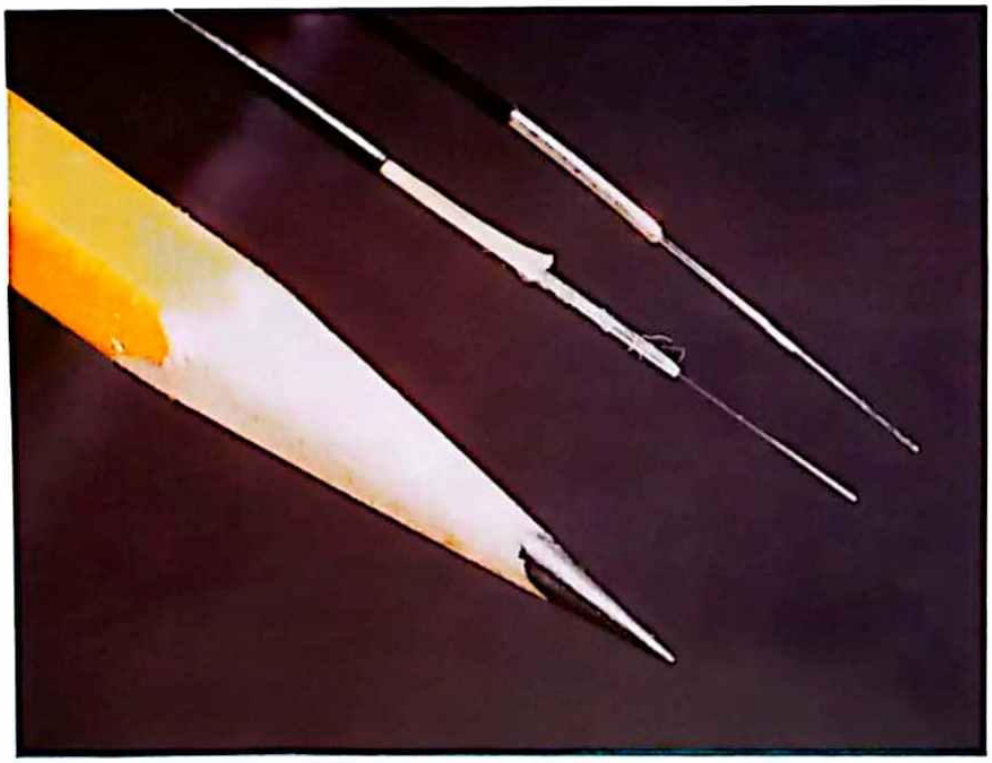
© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990



1. CE TÉLÉOPÉRATEUR *(en haut)* **s'est révélé très intéressant pour les missions de reconnaissance dangereuses. Par l'intermédiaire d'une fibre optique, les signaux enregistrés par deux caméras placées sur le siège du conducteur sont transmis à l'opérateur ; les commandes** *(en bas)* **sont les mêmes que celles d'une jeep normale.**



2. LES ÉLÉMENTS DE BASE d'un téléopérateur comprennent un système d'affichage et des commandes, reliés à des capteurs et à des outils par un système de communications. Les téléopérateurs comportent également une source d'énergie qui permet d'actionner les outils ou de pourvoir au déplacement. On appelle poste maître, le poste de commande occupé par l'opérateur, ou manipulateur, et poste esclave, le poste de travail comportant des outils (perceuse, torche de soudure...) ou un véhicule téléopéré.



3. LES FIBRES OPTIQUES présentent un grand intérêt pour les liaisons de communication des téléopérateurs. Des câbles à une seule fibre, de diamètre parfois inférieur à un quart de millimètre, sont suffisamment solides pour être déroulés d'avion sans se rompre.

« voit » des objets qu'il ne percevrait pas. Des traitements numériques d'images amélioreront prochainement les informations visuelles transmises par les capteurs au système d'affichage : on fera ressortir les objets par rapport au fond et l'on donnera des images détaillées de surfaces peu visibles. Ces traitements ne sont pas toujours indispensables : j'ai montré qu'un observateur peut rapidement percevoir la totalité d'une structure ou d'un objet, même si leur image est incomplète ou noyée dans un « bruit de fond ».

Le gant télécommandé

Dans certains cas, des systèmes sonores complètent la perception visuelle ; par exemple, ils peuvent avertir l'opérateur qui commande un véhicule aquatique en eaux troubles d'une collision imminente. Des systèmes tactiles sont également utiles : des outils dotés de capteurs de pression, qui retransmettent cette information à l'opérateur, permettent à ce dernier d'ajuster la force qu'il exerce et de ne pas endommager les objets qu'il manipule. On a notamment mis au point un gant garni de systèmes de pression qui permet à l'opérateur de « palper » les objets à distance.

Ces systèmes de palpation renseigneront sur la forme des objets manipulés, quand la perception visuelle est occultée, dans de l'eau trouble ou dans un endroit dissimulé aux caméras, par exemple. L'information tactile est aussi utile en téléopération que pour les personnes qui se déplacent dans des endroits sombres ou qui manipulent des objets qu'elles ne voient pas.

On a beaucoup étudié les systèmes visuels et tactiles, mais on a encore assez peu considéré les systèmes de commande. Jusqu'à présent, c'étaient de simples manettes, des interrupteurs ou des leviers, qui communiquaient globalement les actions de l'opérateur à l'outil de travail : une pince se fermait quand l'opérateur agissait sur une commande en forme de ciseaux, par exemple.

Grâce aux progrès de l'informatique, on concevra des systèmes de commande améliorés. Nous avons vu que l'informatique s'est introduite entre les capteurs et les systèmes d'affichage ; de même, elle s'intercale aujourd'hui entre les commandes et les outils. Grâce à un traitement numérique, on pourrait « traduire » les commandes et les dissocier des mouvements effectués par les outils ; on pourrait transformer le système de coordonnées des signaux d'entrée en

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

un autre système de coordonnées, correspondant aux signaux de sortie. On pourrait également amplifier les commandes de façon non linéaire, afin d'augmenter la précision et la force des opérations effectuées par les outils. Enfin on améliorerait l'interface entre l'Homme et la machine afin qu'elle soit la plus naturelle possible.

Plusieurs nouveaux systèmes de commandes sont à l'étude. James Foley, de l'Université George Washington, a réalisé un appareil en forme de gant qui détecte tous les mouvements de la main humaine et transmet les informations à un outil en forme de main (voir *Les communications entre l'Homme et l'ordinateur*, par James Foley, *Pour la Science*, n° 122, décembre 1987). D'autres chercheurs étudient des systèmes qui captent les signaux électriques émis par les muscles et commandent des prothèses (ces prothèses sont beaucoup plus proches de l'opérateur que les téléopérateurs ordinaires, mais ils posent les mêmes problèmes de conception).

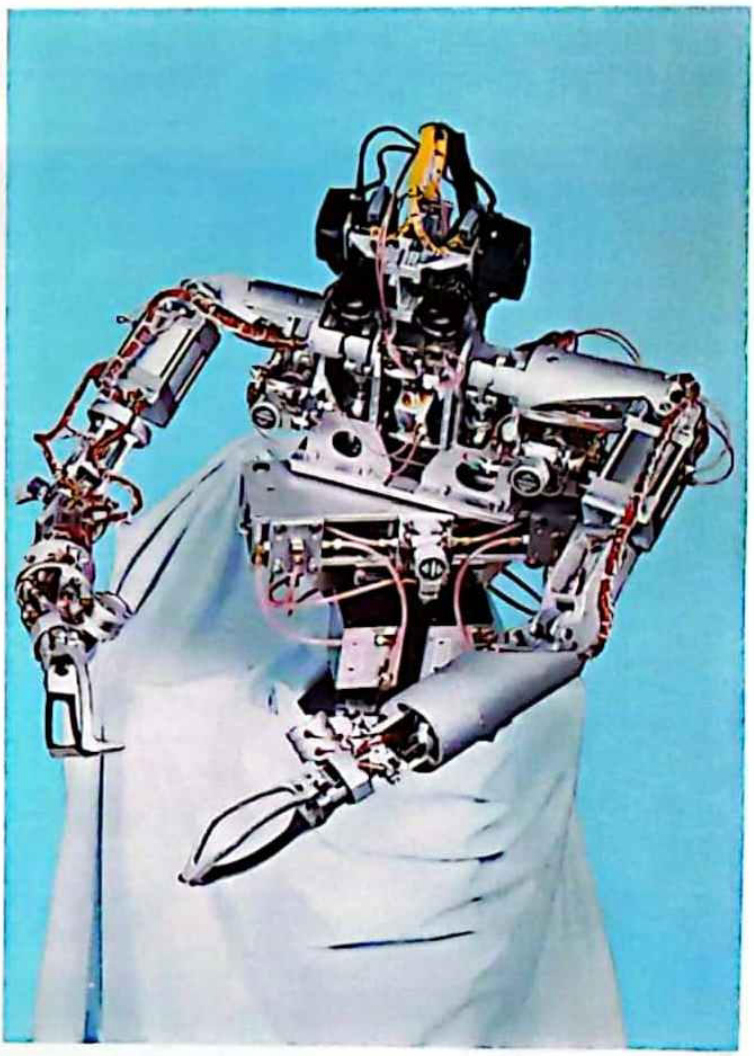
L'apport des fibres optiques

Dans certains téléopérateurs, des fils de cuivre et des liaisons mécaniques ou hydrauliques suffisent à transmettre les informations et les commandes, mais généralement ces systèmes de communication sont insuffisants. Les besoins pour la transmission des commandes sont limités, mais les systèmes de visualisation stéréoscopique utilisent habituellement deux canaux de télévision couleur.

En tirant parti des capacités de la perception humaine, on peut réduire la charge du système de communications entre les capteurs et le système d'affichage : Ross Pepper, de l'Institut international de l'application des sciences, a montré qu'en combinant une image en couleurs de basse résolution sur un canal et une image monochrome de haute résolution sur l'autre, on produit une image stéréoscopique en couleurs de qualité passable, mais fonctionnelle, sans que l'opérateur ne se rende compte de l'économie ainsi réalisée.

Les téléopérateurs conçus pour des missions à très longue distance utilisent des transmissions radio dans l'espace ou à la surface de la Terre et des signaux acoustiques dans le milieu sous-marin. Quand on peut conserver un lien physique entre l'opérateur et l'engin, les fibres optiques sont des systèmes de transmission très intéressants. Une seule fibre transmet jusqu'à 400 millions de bits (ou chiffres binaires) par seconde. Leur diamètre est si petit qu'un seul rouleau peut en contenir 300 kilomètres. Avec des fibres déroulées à partir d'un avion, mon collègue Jack Holtzschuh a commandé des téléopérateurs militaires qui fonctionnaient au sol.

Avec des fibres optiques, on commande également des téléopérateurs sous-marins. Le véhicule mis au point au NOSC par Robert Hoffman est suspendu par un câble qui transmet les informations et l'énergie. Le câble doit résister au poids du téléopérateur,



4. « L'HOMME VERT » est un téléopérateur de forme humaine *(à droite)* commandé par une ossature articulée portée par l'opérateur *(à gauche)*. Deux caméras de télévision envoient les informations dans deux écrans miniatures placés devant les yeux de l'opérateur et deux microphones transmettent le son. Les mouvements du téléopérateur sont identiques à ceux de l'opérateur. Les signaux de commande sont transmis par un système hydraulique du harnais de l'opérateur vers le téléopérateur. Au Centre naval des systèmes, à Hawaii (NOSC), on utilise ce système expérimental pour étudier les facteurs humains qui interviennent dans la téléopération.

mais aussi à son propre poids, qui peut être considérable. En remplaçant les fils de cuivre par des fibres optiques dans les liaisons de communication, on réduit le poids du câble de 23 à 9 tonnes, dans le cas d'une station à grande profondeur (pour les autres types de liaison, comme la transmission d'énergie, on utilise encore le cuivre, l'acier et d'autres matériaux).

Les fibres optiques ne sont pas seulement fines et légères, elles sont remarquablement solides lorsqu'elles sont bien gainées. Les véhicules peuvent passer sur les câbles à plusieurs reprises sans dégrader leurs propriétés optiques et mécaniques et cela, à la différence des câbles électriques. En outre, l'espionnage des fibres optiques est impossible, alors que l'on capte facilement les informations qui transitent par les câbles électriques.

L'homme vert

Examinons maintenant quelques systèmes de téléopérateur mis au point au NOSC. L'appareil le plus intéressant est peut-être celui que l'on a baptisé l'« homme vert » : un prototype de forme humaine conçu par David Smith et Frani Armogida, et réalisé par Herbert Mummery. L'opérateur porte un système articulé et deux écrans de télévision miniatures fixés sur son casque sont placées devant ses yeux. Les commandes sont assurées par l'ossature qui suit les mouvements de l'opérateur. L'« homme vert » reproduit ainsi les mouvements de la tête, des bras, du cou et du torse.

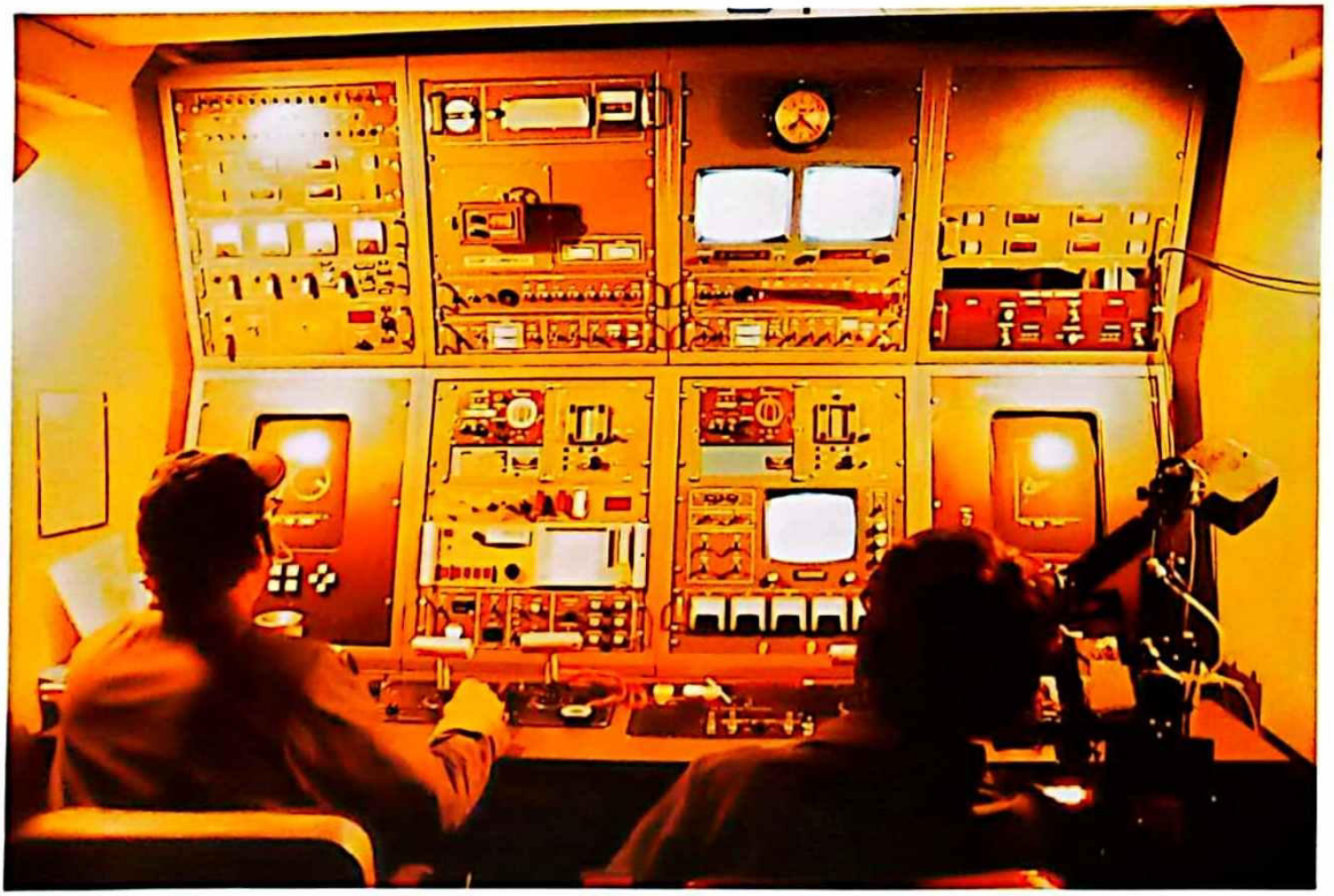
Le téléopérateur, distant de quelques mètres, a une apparence humaine ; il comporte deux caméras de télévision qui envoient les images à l'opérateur, et deux microphones reliés à ses écouteurs procurent une très bonne stéréophonie. Les commandes provenant de l'opérateur sont transmises par un système de commande hydraulique : le torse, le cou, les bras se plient et tournent parallèlement à l'opérateur ; des pinces se ferment quand l'opérateur ferme les doigts.

Les systèmes anthropomorphes sont très utiles quand, dans les missions, la nature des tâches est imprévisible, comme des réparations sous l'eau par exemple. L'opérateur de l'homme vert a véritablement l'impression d'être sur le site de travail et il n'a pas besoin de penser à chacun de ses mouvements pour qu'ils soient fidèlement reproduits. Il reste cependant beaucoup à faire avant que de tels téléopérateurs acquièrent une dextérité égale à celle de l'Homme.

D'autre part, Thomas Hughes et ses collègues étudient pour l'armée américaine le *High-Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle* (véhicule mobile multi-usages), qui remplace la jeep traditionnelle. L'opérateur de cet engin porte un casque sur lequel un système de visualisation stéréoscopique lui présente le terrain ; les signaux proviennent de deux caméras de télévision fixées sur le siège, reliées au poste de commande par une fibre optique. On étudie aujourd'hui beaucoup les propriétés optiques des caméras et des écrans, car on a observé qu'ils déterminent la capacité de l'opérateur à manier la jeep.

L'équipe qui étudie ce téléopérateur doit également tenir compte du « mal du simulateur », une nausée qui handicape souvent les opérateurs dont l'oreille interne n'est pas stimulée lors de la perception du mouvement (amplifiée par le système stéréoscopique). La sensibilité à ce mal varie selon les opérateurs, et l'on recherche les stimuli qui l'aggravent.

T. Hughes et ses collègues étudient



5. LES ÉCRANS ET LES COMMANDES d'un téléopérateur sont parfois complexes. Sur cette photographie, on voit le poste de commande d'un téléopérateur sous-marin mis au point au Centre de systèmes navals d'Hawaii.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

6. CETTE PLATE-FORME VOLANTE est télécommandée. Le prototype mesure environ 60 centimètres de haut ; propulsé par une hélice, il peut survoler de grandes zones. Ses caméras envoient des signaux sur un écran et donnent à l'opérateur l'impression d'être à bord.

aussi un petit téléopérateur de reconnaissance, l'AROD *(Airborne Remotely Operated Device*, un système aérien télécommandé). Ce petit engin effectue des missions de reconnaissance impossibles à réaliser par un observateur au sol. Dans ce cas aussi, le comportement de l'opérateur humain pose des problèmes intéressants : un homme peut fournir une « puissance de calcul » considérable, mais de légères modifications de l'appareil peuvent fortement réduire les capacités de guidage. On ignore s'il vaut mieux placer les détecteurs sur l'appareil, pour donner l'impression du vol, ou au sol afin d'observer l'appareil en vol. Le système de visualisation optimal semble varier selon l'expérience de l'opérateur et la nature de la mission.

Ces prototypes montrent que nous possédons la plupart des éléments techniques pour élaborer des téléopérateurs utiles et complexes, mais que l'interface homme-machine reste à améliorer. En attendant que les progrès de l'informatique substituent l'intelligence artificielle à l'intelligence humaine, l'évolution des moyens de communication entre les opérateurs humains et les machines résultera des progrès en psychologie. ■

La première lignée de robots, les « robots de coopération », est essentiellement fondée sur la notion d'outil, prolongement de l'homme. En France, la première collaboration entre les milieux nucléaires et industriels s'est établie en 1975 par le projet SPARTACUS, à l'initiative de l'IRIA (Institut de recherche en informatique et automatique). Ce programme avait pour objet la mise au point d'une téléthèse pour tétraplégique (c'est-à-dire un système de téléopération permettant à un handicapé moteur de manipuler des objets).

En 1980, le CNRS prit le relais de SPARTACUS avec un programme spectaculaire, ARA (Automatisation et robotique avancée) auquel participèrent 42 équipes de recherche publique et une trentaine d'industriels. De cette collaboration résulta une avancée spectaculaire qu'on désigne sous le terme de téléopération assistée par ordinateur (TAO) qui conduit aujourd'hui à la notion de robot supervisé (par l'homme).

La seconde lignée de robots est celle des « robots de substitution ». Ce ne sont plus des outils qui assistent l'homme, mais des machines censées le remplacer « totalement » pour certaines tâches. À l'origine de cette lignée figurent les premières tentatives « mécaniciennes » avec les automates fameux de Vaucanson et de Jaquet-Droz.

Le premier robot industriel (à base fixe) a été commercialisé vers 1960 par la Société américaine *Unimation*. C'est un simple automate mécanique dont l'organe terminal (la pince) reproduit des trajets par lecture d'un enregistrement analogique. Ce robot de première génération est encore sur maints postes de travail, la modernisation provenant surtout de l'introduction d'un ordinateur dans le module de commande, et de la programmation des mouvements à l'aide de langages simples.

On a pris conscience dans les années 1980 que le robot totalement autonome et mobile, capable d'exécuter une tâche même simple dans un environnement mal connu, ne verrait pas le jour autour des années 1990, comme on le croyait alors, mais probablement après l'an 2000, et peut-être même bien après. Il existe en effet deux difficultés majeures : la structure des ordinateurs actuels est inadéquate (ce qui a relancé les recherches sur les réseaux neuroniques) et entraîne des durées de raisonnement très longues, inacceptables en pratique ; les modes de raisonnement eux-mêmes fondés sur les techniques actuelles de l'intelligence artificielle sont mal adaptés.

Puisque le robot totalement autonome n'est pas encore accessible, donnons-lui le maximum d'autonomie permis par la technique et confions à l'opérateur humain les tâches que l'on ne peut automatiser.

On rejoint l'idée du robot supervisé issu de la téléopération assistée par ordinateur. Ces deux approches ont fusionné bien qu'elles soient parties de deux points de vue différents : pour la TAO, l'homme pilote le robot et lui confie des tâches à réaliser en mode automatique chaque fois que cela lui semble possible ; le « robot de substitution », en revanche, exécute seul ses tâches et fait appel à l'homme chaque fois qu'il rencontre une difficulté.

L'article de William Uttal est une bonne illustration des travaux américains du NOSC en matière de téléopération, essentiellement dirigés vers les applications marines et spatiales. Le *Green Man* (l'homme vert) est une version améliorée de plusieurs projets étudiés par la NASA dès avant la conquête de la Lune.

L'utilisation d'un exosquelette comme système de commande est discutable. La reproduction par le robot des attitudes et de mouvements de l'homme est très difficile car l'exosquelette n'est pas la structure humaine elle-même : il y a toujours des erreurs de reproduction. Par ailleurs, pour l'exécution correcte de certaines tâches, on a besoin de toute la dextérité manuelle, ce qui est très difficile à reproduire. Enfin, l'exosquelette lui-même par sa rigidité gêne les mouvements du pilote et lui enlève une partie de sa dextérité.

Cette recherche, très onéreuse, laissera probablement la place à l'approche TAO ou supervisée, telle que l'évoque un poste de commande (poste maître) d'une station de travail sous-marine (poste esclave). Les retours d'information vers les opérateurs humains permettent de prendre des décisions quant à la mise en route ou à l'arrêt de systèmes et de fonctions automatisées. La tendance générale est d'accroître la part de décision humaine et de diminuer sa part de guidage manuel.

Philippe COIFFET
Directeur de recherche au CNRS
Laboratoire de robotique de Paris.

Les mystères de Mithra

DAVID ULANSEY

Les images de cet ancien culte méditerranéen symbolisent un phénomène astronomique ; le dieu Mithra aurait gouverné les cieux et réglé la destinée de l'Homme.

Dans des centaines de temples souterrains, dispersés sur les régions qui formaient l'Empire romain, de l'Angleterre à la Syrie, des peintures et des sculptures représentent un jeune homme tuant un taureau. La signification de ce motif, l'image sacrée la plus fréquente du culte secret de Mithra, reste l'un des grands mystères de l'archéologie. Quel épisode mythique représente cette image ? Que signifiait la mise à mort du taureau dans ce culte ? Avec plusieurs archéologues, je suis parvenu à une conclusion *a priori* étonnante : cette représentation n'est pas celle d'un mythe terrestre, mais l'expression d'un code astronomique aux multiples conséquences religieuses.

Cette interprétation surprenante devient plus crédible quand on la replace dans le contexte social et religieux, très perturbé, de l'époque. Durant les sept siècles qui ont séparé Alexandre le Grand de Constantin le Grand, la civilisation méditerranéenne a été le berceau de nombreuses religions. Après les conquêtes d'Alexandre, ses successeurs grecs et romains ont établi une culture méditerranéenne unifiée à partir d'une multitude de nations indépendantes, de cités-états et de tribus. Les plus anciennes formes d'expression religieuse, généralement élaborées par de petites sociétés très liées, ont perdu leur sens pour les individus isolés dans un empire immense et de plus en plus impersonnel.

À mesure que les empires grec et romain absorbaient les anciennes cités-états et les tribus, les nouveaux citoyens reculaient aux confins de l'Empire le lieu d'où les puissances secrètes humaines régissaient la vie. Les philosophies et les religions procurant une explication du monde ou un moyen d'agir sur lui comptaient rapidement de nombreux adeptes.

Il est logique que le christianisme soit apparu dans ces circonstances : il promettait l'appartenance à une communauté symbolique – la « Nouvelle Israël » – à ceux dont la communauté physique, soumise à l'ordre impérial, avait perdu son identité. Le fatalisme se développa : tous les événements auraient été fixés par le Destin, ou la Fortune, qui furent divinisés dans de nombreux cultes hellénistiques. L'une de ces philosophies fatalistes était le stoïcisme : le stoïcien endure avec résignation tout ce que la vie lui apporte.

Le fatalisme de cette époque ouvrit la voie à un fatalisme particulier : l'astrologie, qui devint populaire après la période des conquêtes d'Alexandre et proclamait avec force précisions mathématiques que tous les événements étaient soumis à des forces d'origine astrale. L'essor du fatalisme et de l'astrologie fut favorable à l'apparition d'une religion fondée sur les étoiles.

Une nouvelle religion

Le culte de Mithra, ou mithriacisme, est une des religions les plus importantes – et certainement l'une des plus étranges – qui surgirent en même temps que le christianisme. Elle apparut au I^er^ siècle avant J.-C. : Plutarque rapporte que les pirates originaires de Cilicie (région située au Nord-Ouest de la Syrie) pratiquaient des rites mithriaques dès avant notre ère ; ces pirates étaient environ 20 000 et, à leur apogée, ils s'attaquaient à des navires sur toute la mer Méditerranée. Le mithriacisme culmina au III^e^ siècle et succomba à la fin du IV^e^ siècle, alors que le christianisme se développait et que l'Empire romain d'Occident s'effondrait.

La plupart des adorateurs de Mithra étaient des soldats, des fonctionnaires et des négociants ; les femmes étaient exclues du culte. Comme pour de nombreuses religions antiques (les mystères d'Isis et ceux d'Éleusis, par exemple), seuls ceux qui avaient subi une initiation rituelle secrète étaient admis dans la communauté. Ces initiés ne devaient révéler à personne les secrets de leur culte ; ces cultes devinrent les *mysteria*, et leurs membres devaient garder le silence. Le mot « mystère » et ceux de la même famille comme « mysticisme » dérivent du mot grec utilisé pour mentionner les cultes secrets. Le mithriacisme était un culte très hiérarchisé, à sept degrés d'initiation.

En raison du secret qui caractérisait le mithriacisme, nous n'avons pas de description écrite des doctrines mithriaques ; la seule information dont disposent les archéologues qui tentent de reconstituer les enseignements de ce culte, est l'iconographie complexe des temples. On y voit surtout les activités du dieu du culte, Mithra, la scène principale étant celle de la mise à mort du taureau par Mithra, en compagnie d'autres figurants. Cette mise à mort est représentée dans la plupart des temples mithriaques, à la place d'honneur ; elle détient, à l'évidence, la clé du secret des mystères de Mithra, mais en l'absence de texte écrit, on eut des difficultés à lui donner un sens.

L'historien belge des religions Franz Cumont, qui étudia cette mise à mort, a influencé tous les chercheurs du XX^e^ siècle : en 1899, il observa que *Mithra* est le nom grec et latin d'un dieu iranien beaucoup plus ancien, qui symbolisait la lumière et la vérité, et était considéré comme le gardien des pactes et des contrats ; pour déchiffrer la mise à mort, il aurait suffi de chercher des ressemblances avec les éléments symboliques de l'ancienne mythologie iranienne.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

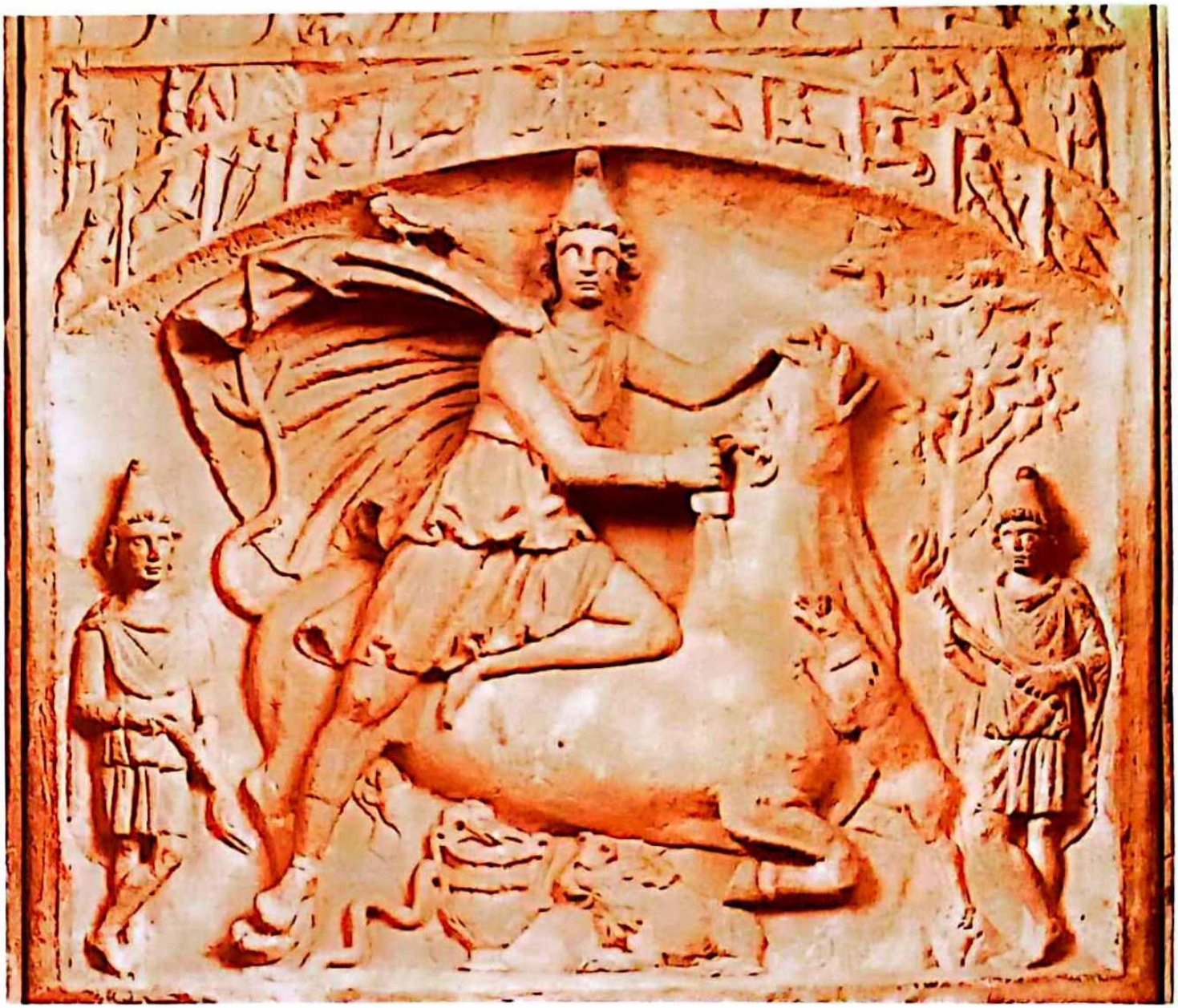
Cette hypothèse souleva plusieurs problèmes : on ne connaissait notamment pas de mythe iranien où Mithra mettait à mort un taureau. Cumont avait découvert une mise à mort, dans un mythe iranien de la création, mais c'était Ahriman, l'incarnation du mal, qui tuait un taureau dont le sang et le corps engendraient les créatures terrestres. Selon Cumont, il avait existé une variante de ce mythe où le bon Mithra remplaçait le diabolique Ahriman dans la mise à mort du taureau. La renommée de Cumont était telle que ses théories ne furent pas contestées pendant plus de 70 ans.

Les premières attaques apparurent au premier Congrès international d'études mithriaques, qui se tint à Manchester, en 1971 : selon John Hinnells, de Manchester, et R. Gordon, de l'Université d'East Anglia, le mithriacisme aurait été une religion nouvelle, créée dans le monde gréco-romain et qui aurait emprunté le nom d'un dieu iranien pour paraître plus exotique et bénéficier du prestige du passé.

Si la mise à mort du taureau ne représentait pas un mythe iranien, que signifiait-elle ? Depuis le milieu des années 1970, Roger Beck, de l'Université de Toronto, Stanley Insler, de l'Université Yale, Michael Speidel, de l'Université de Hawaï, Alessandro Bausani, de l'Université de Rome, et moi-même cherchons à montrer que cette représentation est une carte stellaire ; nous utilisons cette hypothèse afin de réinterpréter le mithriacismse.

Dans la région méditerranéenne, l'astrologie s'est introduite dans la vie religieuse et intellectuelle à l'époque où le mithriacisme apparut. Cette introduction était une manifestation du fatalisme qui se développait : l'astrologie sécurisait les individus, coupés de leurs traditions locales et libres de se déplacer partout dans l'Empire, car ses symboles nouveaux donnaient un sens à la vie quotidienne, sans être attachés à un lieu particulier ni à une communauté, comme c'était le cas des formes religieuses plus anciennes. Comme la configuration des étoiles semblait la même en tous les points de l'Empire, elle pouvait être la base idéale d'un système symbolique universel.

Ceux qui croyaient à l'astrologie



1. LA MISE À MORT DU TAUREAU, qui apparaît sur ce bas-relief trouvé en Allemagne, est la principale représentation du culte de Mithra. Le mithriacisme était fortement teinté d'astrologie : les personnages et objets symbolisent des constellations, et les signes du Zodiaque décorent l'arche qui domine la scène. Selon l'auteur, cette représentation symbolise la précession des équinoxes : vers 2000 ans avant notre ère, l'équinoxe de printemps, qui était dans la constellation du Taureau, entra dans celle du Bélier. Les adorateurs de Mithra croyaient que leur dieu commandait les mouvements de précession.

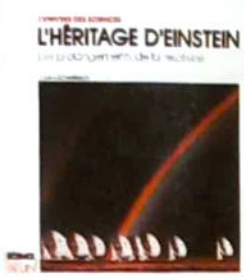
POUR LA SCIENCE

VOUS RECOMMANDE CES LIVRES DE QUALITÉ

Voici une centaine de livres à lire et à offrir qui répondent, chacun dans son domaine, aux critères d'excellence de POUR LA SCIENCE. En utilisant le bon de commande ci-contre, vous bénéficiez de 3 avantages considérables : ■ Vos livres arrivent directement chez vous ou à votre lieu de travail ■ Vous bénéficiez des mêmes prix qu'en librairie : nous prenons à notre charge les frais d'envoi ■ Une facture acquittée sera jointe à votre commande. Décidément, POUR LA SCIENCE vous propose les meilleurs livres dans les meilleures conditions.

■ L'UNIVERS DES SCIENCES

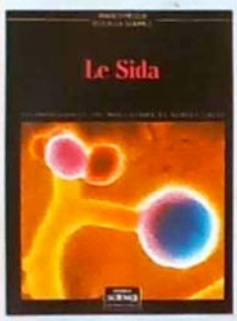
De grands thèmes scientifiques d'aujourd'hui traités par de grands chercheurs dans des livres de prestige...



0010 Les puissances de dix : cassette vidéo 220 F
1833 Les puissances de dix 165 F
1836 La diversité des hommes 180 F
1835 Le son musical 190 F
1837 Le monde des particules 185 F
1849 Formes optimales et mathématiques 180 F
1840 Chaleur et désordre 185 F
1852 La cellule vivante 392 F
1854 Les drogues et le cerveau 185 F
1855 L'héritage d'Einstein 190 F

■ BIBLIOTHEQUE POUR LA SCIENCE

L'encyclopédie scientifique de haut niveau de langue française...



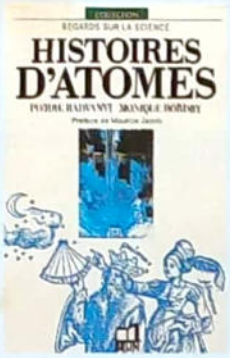
1824 Le cerveau 140 F
1809 L'évolution 120 F
1828 Les particules élementaires 140 F
1816 Histoires de machines 130 F
1823 La physiologie des animaux 120 F
1826 Les nouveaux moyens de la médecine 148 F
1804 La dérive des continents 140 F
1822 Les tremblements de terre 130 F
1805 Hérédité et manipulations génétiques 130 F

1827 23 expériences d'amateur 90 F
1830 L'aube de l'humanité 130 F
1813 Les phénomènes naturels 110 F
1834 L'intelligence de l'informatique 120 F
0481 Cette roche nommée pétrole 95 F
1838 Les volcans 120 F
1841 Des gènes aux protéines 148 F
1829 Vie et mort des étoiles 130 F
1848 Les instrument de l'orchestre 110 F
1808 La magie des paradoxes 66 F
1815 Math'festival 62 F
1818 Math'circus 62 F
1819 Tempête sur l'échiquier 62 F
1850 Les molécules de la vie 140 F
1853 Les mathématiques d'aujourd'hui 140 F
1851 Le monde mathématique de Martin Gardner 95 F
1847 Récréations informatiques 110 F
1857 La paix surarmée 120 F
1858 Les virus : de la grippe au sida 120 F
1863 L'adaptation 140 F
1842 L'Univers des faits aux théories 148 F
1874 Le Sida 96 F
1879 Le calcul intensif 96 F
1878 L'ordre du chaos 130 F

■ REGARDS SUR LA SCIENCE

Une approche synthétique des grands sujets scientifiques

1861 Le soleil noir des nuits blanches 70 F
1844 Histoire d'une grande idée, la relativité 71 F
0545 Comment choisir une diététique ? 78 F



0533 Le matin des mathématiciens 70 F
0607 12 clés pour la biologie 70 F
0628 Le guide illustré du pétrole 60 F
0613 Le guide illustré de la génétique 65 F
1049 12 clés pour l'électronique 56 F
0614 Le guide illustré de l'informatique 68 F
1088 12 clés pour la géologie 60 F
1108 Expériences de topologie 80 F
1050 Visages du choléra 84 F
0645 Kiné-guide de vos articulations 62 F
1112 Histoires d'atomes 95 F
1107 La fondation des prix Nobel scientifiques 95 F

■ SCIENCES D'AVENIR

La Science en train de se faire, les questions qui restent ouvertes

1870 L'évolution 78 F
1871 Les mathématiques 96 F
1869 La chimie 58 F

■ SCIENCE ET HUMOUR

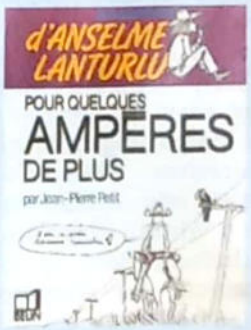
0442 Les mathématiques venues d'ailleurs 72 F
0452 Diabolo Math 65 F
0449 Savants en folie 41,50

■ LA SCIENCE EN BANDES DESSINÉES

Des bandes dessinées qui stimulent le cortex et les zygomatiques...

LES AVENTURES D'ANSELME LANTURLU
0372 Le géométricon 57 F
0376 L'informagique 57 F
0368 Si on volait ? 57 F
0388 Tout est relatif 57 F
0389 Le trou noir 57 F
0390 Big bang 57 F
0456 A quoi rêvent les robots ? 57 F
0467 Le mur du silence 57 F
0485 Elle court, elle court l'inflation 57 F
0494 Énergétiquement vôtre 57 F
1277 Pour quelques ampères de plus 57 F

0489 Cosmic story 57 F
0466 Le topologicon 57 F
0469 Mille milliards de soleils 57 F



LES CHRONIQUES DE ROSE POLYMATH
0445 Oh ! Catastrophe 52 F
0446 Les fractals 52 F
0447 Ah ! Les beaux groupes 52 F

DIVERS
0514 La formule magique 57 F
0608 La grande gratouille Les acariens 57 F
0625 Tais-toi et vole 57 F
1093 Les dinosaures 57 F

■ INFORMATIQUE

Des guides performants et sans jargon pour faire face au défi de l'informatique...

COLLECTION MODULO
0855 Programmatique 90 F
0859 Initiation à l'algorithmique 95 F
0521 Programmer, c'est pas sorcier 140 F
0525 Apprendre à programmer 160 F
0527 Dictionnaire de la micro-informatique 298 F
0591 Le système d'exploitation Unix 150 F
0588 Mieux programmer 110 F
0502 Basic pour micro-ordinateurs 180 F
0523 Le logo 95 F
0524 Initiation aux bases de données 95 F
0517 Logibul au pays de l'informatique APPLE 95 F
1105 Programmation avancée en Pascal 260 F
1247 Word perfect 4.1 et 4.2 150 F
1248 Word perfect 5.0 195 F
1246 MS-DOS/PC-DOS 120 F

LIVRES

BON DE COMMANDE

à renvoyer, avec votre règlement, sous enveloppe affranchie, à

POUR LA SCIENCE 8, rue Férou - 75006 PARIS.

☐ Je désire recevoir les livres indiqués ci-dessous.

N° de code_____ Titre_____ Nombre d'exemplaires_____ Prix_____

N° de code_____ Titre_____ Nombre d'exemplaires_____ Prix_____

N° de code_____ Titre_____ Nombre d'exemplaires_____ Prix_____

N° de code_____ Titre_____ Nombre d'exemplaires_____ Prix_____

N° de code_____ Titre_____ Nombre d'exemplaires_____ Prix_____

N° de code_____ Titre_____ Nombre d'exemplaires_____ Prix_____

Prix total de la commande:_____ _____ F.

Je vous envoie ci-joint mon règlement par :

☐ chèque à l'ordre de POUR LA SCIENCE

☐ carte bleue n° |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|

Date d'expiration _____

Signature (obligatoire) :

M., Mme, Mlle, Prénom _____ Nom _____

Adresse complète _____

_____ Code Postal |_|_|_|_|_| Ville _____

◀ **Pour commander vos numéros anciens**

NUMEROS ANCIENS

BON DE COMMANDE

à renvoyer, avec votre règlement, sous enveloppe affranchie, à

POUR LA **SCIENCE** 8, rue Férou - 75006 PARIS.

☐ Je désire profiter de votre offre spéciale de 12 numéros pour le prix de 10 : soit 290 F seulement au lieu de 348 F.
Je recevrai en **CADEAU** L'Index Thématique.

N°_____ Nbre d'exp. _____ N°_____ Nbre d'exp. _____
N°_____ Nbre d'exp. _____ N°_____ Nbre d'exp. _____
N°_____ Nbre d'exp. _____ N°_____ Nbre d'exp. _____
N°_____ Nbre d'exp. _____ N°_____ Nbre d'exp. _____
N°_____ Nbre d'exp. _____ N°_____ Nbre d'exp. _____
N°_____ Nbre d'exp. _____ N°_____ Nbre d'exp. _____

Numéros épuisés : 0 à 38 inclus, 43 – 49 – 73 – 98 et 134.

Reliures (2 reliures par an, prix de la paire)
FRANCE : 70 F - AUTRES PAYS : 80 F - Nombre de paires _____

☐ Je désire recevoir gratuitement l'index thématique par mots clefs 1988.

☐ Je commande les numéros indiqués ci-dessous au prix unitaire de 29 F.

N°_____ Nombre d'exemplaires _____
N°_____ Nombre d'exemplaires _____
N°_____ Nombre d'exemplaires _____
N°_____ Nombre d'exemplaires _____
N°_____ Nombre d'exemplaires _____
N°_____ Nombre d'exemplaires _____

Prix total de la commande: _____ F.

Je vous envoie ci-joint mon règlement par :

☐ chèque à l'ordre de
POUR LA SCIENCE

☐ carte bleue n° |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|
Date d'expiration _____
Signature (obligatoire) :

M., Mme, Mlle, Prénom _____ Nom _____

Adresse complète _____

Code Postal |_|_|_|_|_| Ville _____ Pays _____

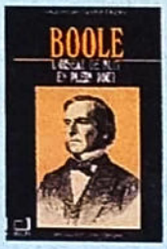
Pour commander vos livres ▶

IBM

0589 Logibul au pays de l'informatique PC 95 F
0592 Guide du PC 150 F
1015 Programmer, c'est pas sorcier sur PC 140 F
0863 Guide de l'informatisation 145 F

■ UN SAVANT, UNE ÉPOQUE

Les biographies de ceux qui ont fait la Science...



0529 Darwin 70 F
0510 Cauchy 75 F
0528 Yukawa 70 F
0531 Wegener 70 F
0530 Hardy 75 F
0563 Von Frisch 85 F
0570 Mendel 80 F
0617 Linné 120 F
0620 Edison 95 F
0618 Tesla 110 F
1121 Berthelot 96 F
1122 Arago 120 F
1081 Langevin 96 F
0562 Duhem 85 F
1134 Bacon 110 F
1057 Humboldt 120 F
1103 Planck 108 F
0621 Abel 120 F
1038 Boucher de Perthes 90 F
1120 Boole 75 F

■ LA SCIENCE À PORTÉE DES ENFANTS

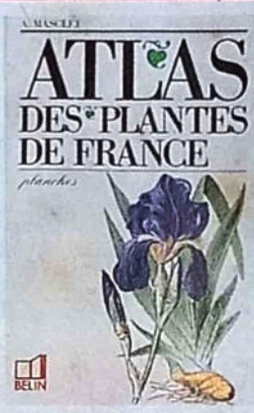
Des textes et images qui ravissent les « scientifiques » de 3 à 14 ans...

0486 La fête des petits matheux 1 55 F
0508 La fête des petits matheux 2 55 F
0548 Les petits débrouillards 1 42 F
0549 Les petits débrouillards 2 42 F
0550 Les petits débrouillards 3 42 F
1056 Les petits débrouillards 4 45 F
0798 Les voyages fantastiques de Globulo 65 F
0799 Jardinez avec le professeur Scientifix 65 F
0492 Depuis le big bang 57 F
0517 Logibul au pays de l'informatique 95 F
0496 Serge Lang, des jeunes et des maths 64 F
0497 Serge Lang fait des maths en public 64 F
0609 Le Roi Arthur 65 F
0610 Perceval et Lancelot 65 F
0611 La quête du Graal 65 F
0612 Les derniers chevaliers de la Table Ronde 65 F
0490 Les premiers astronomes 57 F
0491 L'astronomie moderne 57 F

■ LES NOUVELLES FLORES DE BONNIER

Chefs-d'oeuvre du patrimoine naturaliste français enfin réédités...

1000 Flore complète portative 132 F
1001 Nouvelle flore 90 F
1002 Flore du Nord de la France 95 F

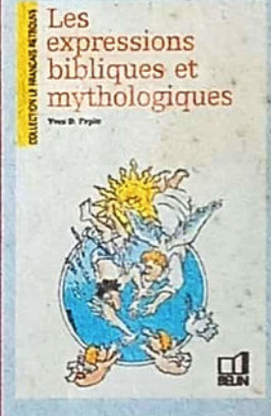


1003 Les noms des fleurs 110 F
1004 Petite flore 50 F
1006 Nouvelle flore des champignons 70 F
1007 Les mauvais et les bons champignons 35 F
1008 Nouvelle flore des mousses et des hépatiques 70 F
1009 Nouvelle flore des lichens 80 F
1010 Cours complet d'apiculture 100 F
1011 Plantes médicinales 70 F
1092 Atlas des plantes de France (volume planches) 250 F
1102 Atlas des plantes de France (volume texte) 120 F
1202 Atlas Plantes Coffret (2 vol.) 350 F

■ LE FRANÇAIS RETROUVÉ

Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur la langue française...

0534 Les mots du vin et de l'ivresse 64 F
0382 Trésors des expressions françaises 58 F
0383 Trésors des racines grecques 64 F
0384 Trésors des racines latines 64 F
0385 Trésors de la politesse française 60 F
0470 Trésors des racines patoisantes 60 F
0476 Les noms des villes et de villages 64 F
0475 Locutions et proverbes d'autrefois 58 F
0487 Trésors des noms de famille 64 F
0512 Aux sources des chansons populaires 64 F
0551 Les mots de la philosophie 64 F
0547 Dictons de la pluie et du beau temps 58 F
0619 Dictons des bêtes, des plantes et des saisons 64 F
1051 Les mots d'origine gourmande 64 F
1053 Trésors des mots exotiques 64 F
1054 Le Français écorché 64 F

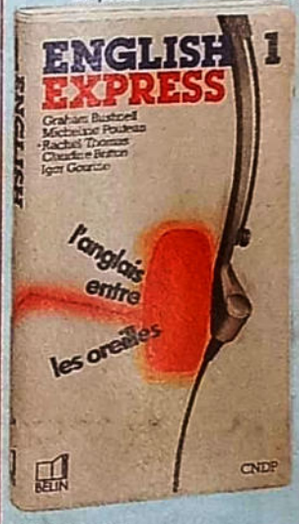


1150 Les mots pittoresques de la table 64 F
1052 Les mots du cinéma 87 F
1091 Les mots de la francophonie 66 F
1149 Les étymologies surprises 68 F
1159 Les expressions bibliques et mythologiques 68 F

■ COLLECTION CLÉS ANGLAISES

L'anglais, tel qu'on le parle, tel qu'on l'écrit aujourd'hui...

0600 Grammaire anglaise de poche 72 F



0543 L'anglais pour ceux qui n'y croient plus 50 F
0544 Les sigles de la presse anglaise 45 F
0546 The book of English Pop and Slang 72 F
0567 Ready ? Steady ? Go !!! 44 F
0626 English in the news 72 F
0900 English Express 1 (3 cassettes + livret) 230 F
0901 English Express 2 (3 cassettes + livret) 230 F
1109 English in the mail 60 F
1090 L'anglais à haute fréquence 75 F
1170 Médical dictionary 100 F
1190 British humour 64 F

VOUS AVEZ FAIT VOTRE CHOIX ?

Renvoyez votre commande, accompagnée de votre règlement à :

POUR LA SCIENCE
8, rue Férou – 75006 Paris

COMPLETER VOTRE COLLECTION DE

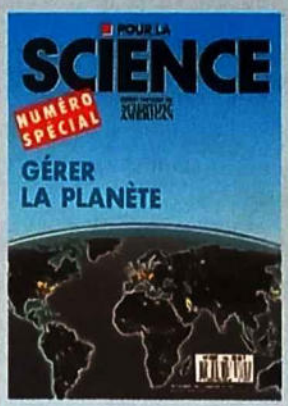
POUR LA SCIENCE

12 NUMÉROS ANCIENS POUR LE PRIX DE 10

N°s	TITRES
39.	La turbulence. Un mirage gravitationnel. Oreille et équilibre.
40.	Les images dans les miroirs. Le problème de la drogue.
41.	Le cœur artificiel. Les moteurs du futur.
42.	La lutte anti-sous-marine. Les nuages.
45.	Les algorithmes. L'architecture chinoise standardisée.
46.	La formation de la Terre. La gestion optimisée.
47.	Valeurs et attitudes du peuple polonais.
48.	Le T.G.V. La maladie de l'orme.
50.	Le pain. la logique antique.
51.	Les anneaux des planètes. La naissance de la Terre.
52.	Jupiter et Saturne. Algèbre et ordinateur.
53.	Les super-ordinateurs. La psychologie du choix collectif.
54.	La chimie des flammes. Les serpents.
55.	L'hygiène hospitalière. La cocaïne. Les galaxies.
56.	Les plates-formes de forage. Gustave Eiffel.
57.	Le cœur et le sport. Démographie du Tiers Monde.
58.	Les bancs de poissons. Lascaux.
59.	Les avions ultra-légers. Les nouveaux cubes hongrois.
60.	Les allergies. L'affaire Galilée. Les milieux hétérogènes.
61.	**La mécanisation du travail (numéro spécial)**
62.	L'intelligence artificielle. Les éclipses historiques
63.	Le gel des armements. Les criquets.
64.	L'ordinateur individuel. Néanderthal et Cromagnon.
65.	Les machines qui marchent. La signature numérique.

N°s	TITRES
66.	L'ordinateur optique. Les vaccins de synthèse.
67.	La mémoire des oiseaux. La microprogrammation.
68.	Les rêves et le cerveau. Les microcapteurs.
69.	La méthode bootstrap. Le camembert.
70.	La fermeture à glissière. La vie des parasites.
71.	La fracture des continents. La vie de Cauchy.
72.	Le sceau médiéval. La typographie numérique
74.	Le cognac. La mer Morte.
75.	L'attaque nucléaire. Les cercles de pierre.
76.	Les véhicules mus par la force musculaire.
77.	Le riz. L'invention du ballon.
78.	Climat et orbite terrestre.
79.	Des Primates à l'Homme. Le son des muscles.
80.	Les tornades. Les dinosaures
81.	Les épidémies. Les miniaciéries.
82.	Les coléoptères. Les orfèvres des Andes.
83.	Les volcans sous-marins. Les immunotoxines.
84.	L'origine du pétrole. La vision des robots.
85.	**Spécial informatique : les logiciels (numéro spécial).**
86.	Le palais de cristal. Le chocolat.
87.	Le gothique. L'athérosclérose.

N°s	TITRES
88.	Le scorpion. Le vidéodisque.
89.	L'arbalète. Le calcul parallèle.
90.	Roulette et loto. La prothèse auditive.



91.	Le saut de la baleine. La clarinette.
92.	L'anesthésie. Poisons et venins. Panaches et points chauds.
93.	La maladie des vitraux. Anagrammes et pangrammes.
94.	La topologie des mirages. La défense de la peau.
95.	Le darwinisme. Les limites du calcul.
96.	Les fractals. La prolifération nucléaire.
97.	L'ordinateur en chimie.
99.	Les cartes à puces. La lutte contre le cancer.
100.	SIDA et immunologie. Le Ru 486.
101.	La peau de remplacement. Index.
102.	L'astronomie en Islam. Lasers à électrons libres.

N°s	TITRES
103.	L'hémophilie. L'aquaculture.
104.	Le gyroscope optique. La naissance.
105.	Le guépard survivra-t-il ? Darwin géologue.
106.	Navigation et intelligence artificielle. Les éoliennes.
107.	Les simulateurs de vol. Les montagnes.
108.	La fusion par laser. Les Mayas.
109.	Chimie et topologie. La couleur des choses.
110.	**Les matériaux du futur (numéro spécial).**
111.	Voyager 2. Galliée et Bruno.
112.	Rétrovirus et SIDA.
113.	Le virus du SIDA.
114.	Les anneaux de Rubik. Les pulsars.
115.	La chimie des parfums. La dyslexie.
116.	La bilharziose. La lutte contre les virus.
117.	Glucose et vieillissement. Le climat.
118.	Le psoriasis. Anatomie de la mémoire.
119.	Les ondelettes. Les molécules de la vision.
120.	La pollution atmosphérique. La théorie de la sélection clonale.
121.	Les nouveaux supraconducteurs.
122.	**L'informatique du futur (numéro spécial).**
123.	Les chromosomes artificiels. Le rayonnement synchroton.

N°s	TITRES
124.	Les cordes cosmiques. Les réseaux de neurones formels.
125.	Le monde quantique. Le trou d'ozone antarctique.
126.	Les plastiques conducteurs. La cartographie des chromosomes.
127.	L'algèbre du tennis. Fécondité et embonpoint.
128.	Morphine et douleur. L'ordinateur, instrument d'orchestre.
129.	Le recuit simulé. La nécrose des tumeurs.
130.	Pérovskites et supraconducteurs. La physiologie de l'alpiniste.
131.	Les facteurs de croissance. Les condensateurs.
132.	Les médicaments photoactivés. Sophie Germain. La réplication de l'ADN.
133.	La chirurgie du crâne chez l'enfant.
135.	Les métastases. La foudre.
136.	La plasticité du cerveau. Les lasers à rayon X.
137.	Le mélange des fluides. Sucres et dépression.
138.	Les couches de diamant. Les gènes de la vision des couleurs.
139.	Les verres métalliques. Les cristaux de macromolécules.
140.	Une molécule contre la douleur. Le réchauffement de la Terre.
141.	Le déplacement des vertébrés. Les aurores.
142.	Tremblements de terre cachés. L'absinthe.
143.	Les zéolithes. Claude Perrault.
144.	La culture des champignons. La supernova de 1987
145.	**Gérer la planète (numéro spécial).**
146.	Gaspard Monge. Microscopes à sonde locale.
147.	Les silicones. L'archéoptéryx.

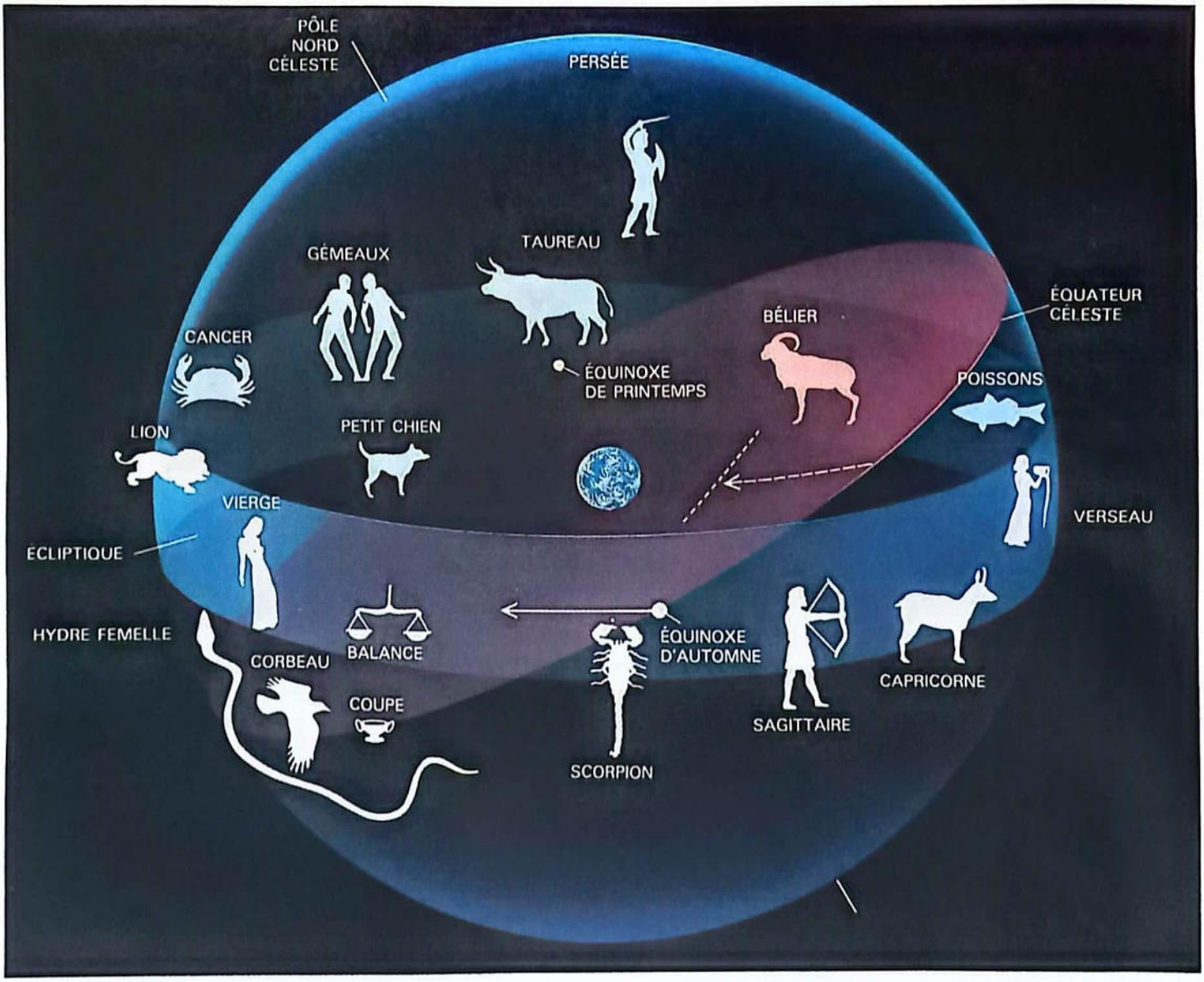
commencèrent à penser que les dieux résidaient dans le royaume des astres. C'est au cours de l'époque hellénistique que l'on prit l'habitude de donner aux planètes le nom de divinités grecques, telles que Zeus (Jupiter) et Ares (Mars). On se mit à croire qu'après la mort, l'âme ne descendait pas aux Enfers, comme on le pensait auparavant, mais qu'elle s'élevait à travers les sphères successives des planètes, jusqu'à la sphère des étoiles fixes, puis vers le Paradis, situé au-delà de la sphère la plus éloignée. On imagina que ce périple était dangereux, et que le franchissement de chaque sphère n'était autorisé qu'aux détenteurs de mots de passe secrets.

Les concepts astronomiques semblent avoir été importants dans le mithriacisme : les symboles astronomiques sont fréquents dans l'iconographie mithriaque. Les 12 signes du Zodiaque et les symboles du Soleil, de la Lune et des planètes accompagnent souvent la mise à mort du taureau, dans l'art mithriaque. Au Ier ou au IIe siècle, Eubulus écrivit que le temple mithriaque représentait « une image du cosmos ». Il semble aujourd'hui que la mise à mort soit elle-même un symbole astral.

Sept constellations

Mithra et le taureau sont généralement accompagnés d'un chien, d'un serpent, d'un corbeau, d'un scorpion et parfois d'un lion et d'une coupe. Manifestement chacune de ces figures correspond à une constellation : celle du Petit Chien, de l'Hydre femelle, du Corbeau, du Scorpion, du Lion, de la Coupe ; le taureau également a son analogue céleste. Nous avons cherché à expliquer pourquoi ces sept constellations ont formé les représentations fondamentales d'un puissant mouvement religieux.

Les sept constellations sont liées dans le ciel comme sur la scène de mise à mort : à l'exception de la constellation du Lion, elles sont toutes sur une position ancienne de l'équateur céleste. L'équateur céleste est une projection de l'équateur terrestre sur la sphère céleste ; c'est un cercle imaginaire, incliné de 23 degrés par rapport au plan de l'orbite terrestre (l'écliptique, ou le plan que définit le cercle du Zodiaque). L'équateur céleste coupe le Zodiaque aux « équinoxes », c'est-à-dire aux points de la



2. L'ÉQUATEUR CÉLESTE *(le disque violet)* **se déplace dans le ciel, parce que l'axe de la Terre effectue un mouvement de précession. De ce fait, les équinoxes (les points où l'équateur céleste traverse le plan de l'écliptique, ou plan de l'orbite terrestre) se décalent progressivement à travers les 12 constellations du Zodiaque (ce dernier est la zone de la sphère céleste limitée par deux petits cercles de cette sphère et où se situe le mouvement apparent du Soleil). Les Anciens qui croyaient que la Terre était au centre de l'Univers, interprétaient la précession comme un mouvement de la sphère céleste – et donc comme un déséquilibre du cosmos tout entier. Les figures représentées dans la mise à mort du taureau symbolisent les constellations qui se trouvaient sur l'équateur céleste, entre 4200 et 2000 avant J.-C., quand l'équinoxe de printemps avait lieu dans la constellation du Taureau.**

sphère céleste où apparaît le Soleil au premier jour du printemps et au premier jour de l'automne.

Dans l'Antiquité, l'équateur céleste n'était pas réduit à un cercle imaginaire ; les Anciens croyaient que la Terre était immobile au centre de l'Univers ; les étoiles « fixes » étaient réparties sur une grande sphère, qui tournait autour de la Terre une fois par jour, autour d'un axe passant par ses pôles. Les Anciens attachaient beaucoup d'importance aux caractéristiques de cette sphère des fixes ; ses pôles, son équateur et l'équateur céleste étaient bien mieux connus qu'ils ne le sont aujourd'hui. Dans le *Timée*, par exemple, Platon écrit que le Créateur de l'Univers commença à façonner le cosmos, en donnant à sa substance la forme de la lettre *X*, pour représenter l'intersection de l'écliptique et de l'équateur céleste *(voir la figure 2)*.

Pendant l'Antiquité, on croyait que l'axe de la sphère céleste était immobile, comme la Terre. En fait, l'axe de rotation de la Terre (l'équivalent moderne de l'ancien axe cosmique) oscille ; l'équateur céleste suit cette oscillation, de sorte que les positions relatives de l'équateur et de l'écliptique changent. En raison de cette précession des équinoxes, la position du Soleil dans le ciel, à l'équinoxe, recule légèrement le long de l'écliptique, et l'équinoxe se produit chaque année un peu plus tôt. Le cycle de précession des équinoxes dure 25 920 ans, et le Soleil traverse une constellation en 2160 ans environ. Aujourd'hui l'équinoxe de printemps se trouve dans la constellation des Poissons ; et vers l'an 2200, il entrera dans celle du Verseau. Durant la période gréco-romaine, l'équinoxe de printemps était dans celle du Bélier, où il était entré environ en 2000 avant J.-C., après avoir été dans celle du Taureau.

La précession des équinoxes

À l'exception de celle du Lion, toutes les constellations symbolisées dans la mise à mort du taureau se trouvaient sur l'équateur céleste quand l'équinoxe de printemps était dans la constellation du Taureau ; la constellation du Lion marque l'emplacement qu'occupait le Soleil au solstice d'été (la position du solstice change également du fait de la précession). La disposition des constellations dans la mise à mort du taureau correspond à la situation astronomique qui régnait 2000 ans avant le début du mithriacisme.

Comment les adeptes du mithriacisme ont-ils eu connaissance de cette ancienne disposition astronomique et pourquoi y ont-ils accordé une signification religieuse ? La précession des équinoxes ne fut découverte qu'aux environs de 125 avant J.-C., par l'astronome grec Hipparque, quelques dizaines d'années avant l'apparition du mithriacisme. Par des observations minutieuses, Hipparque montra que l'équateur céleste se décalait progressivement sur le Zodiaque ; il calcula également les constellations qui se trouvaient sur l'équateur céleste quand l'équinoxe était dans la constellation du Taureau (sa position qui précéda celle de la période gréco-romaine).

Du point de vue géocentrique qui régnait à l'époque, la précession (un mouvement de la Terre) semble être un mouvement de toute la sphère cosmique. Pour des individus qui croyaient en outre que les mouvements des astres influençaient leurs destinées, la découverte de la précession des équinoxes a dû être bouleversante : la sphère des étoiles fixes semblait perturbée par une force apparemment plus puissante que le cosmos lui-même. Les intellectuels antiques, habitués à reconnaître l'œuvre des dieux dans les phénomènes naturels, ont pu considérer ce grand mouvement comme la révélation d'une divinité puissante, jusqu'alors insoupçonnée.

La signification de la mise à mort du Taureau semble claire : la mort du taureau symbolisait la fin de la période pendant laquelle l'équinoxe de printemps était dans la constellation du Taureau, et le début d'une nouvelle ère. Les autres figures de la scène symbolique représentent toutes des constellations que la précession faisait disparaître de l'équateur céleste.

En tuant le taureau – c'est-à-dire en décalant les équinoxes –, Mithra déplaçait tout l'Univers ; un dieu si puissant méritait d'être vénéré ! Mithra pouvait aussi maîtriser les forces du destin résidant parmi les astres et garantir à l'âme, après la mort, une traversée sans encombre des sphères planétaires.

D'autres représentations mithriaques indiquent que Mithra incarnait une telle puissance cosmique : dans certaines, il porte la sphère de l'Univers sur son épaule ; dans d'autres, il est encore jeune et tient la sphère cosmique d'une main, pendant qu'il fait tourner le Zodiaque de l'autre. Dans plusieurs cas, son manteau est constellé. Le rôle de Mithra, force responsable de la précession de l'équinoxe, justifiait aussi le secret qui entourait le mithriacisme. Les initiés croyaient peut-être qu'ils possédaient un secret puissant, qu'il valait mieux ne pas partager. La période d'endoctrinement était sans doute longue, car les élus devaient comprendre le phénomène astronomique complexe associé à l'existence du dieu : seules des personnes en pleine possession de ces connaissances pouvaient apprécier leur nouveau dieu.

De Persée à Mithra

Si toutes les figures de la mise à mort du taureau représentent des constellations, quelle est celle correspondant à Mithra ? Mithra est représenté au-dessus du taureau et il apparaît toujours sous les traits d'un jeune homme portant un poignard et coiffé d'un bonnet phrygien. Or, juste au-dessus de la constellation du Taureau figure la constellation de Persée : ce héros grec, armé d'une dague et coiffé d'un bonnet phrygien, était vénéré en Cilicie, là où naquit, selon Plutarque, le culte de Mithra.

Tarse, la capitale de la Cilicie, était le foyer d'une des plus importantes communautés intellectuelles de la Méditerranée. Elle était dominée par les philosophes stoïciens, célèbres pour leur fatalisme (qui les poussa vers l'astrologie), et qui personnifiaient les forces naturelles sous la forme de dieux et de héros. Il est probable que les intellectuels de Tarse se sont interrogés sur la force responsable de la précession des équinoxes, et qu'ils personnifièrent cette puissance sous les traits du dieu cilicien Persée, déjà associé à une constellation dont la position céleste s'accordait avec le phénomène récemment découvert.

Cependant, si Mithra était initialement Persée, pourquoi a-t-il changé de nom ? D'abord parce qu'une religion secrète doit cacher la véritable identité de sa divinité. D'autre part, parce que l'on pensait que Persée avait fondé la Perse (l'Iran) : on l'a sans doute associé au dieu mythologique iranien de la lumière et de la vérité, Mithra. Enfin, parce qu'à l'époque de la naissance du mithriacisme, la majeure partie de l'Asie mineure fut conquise par le roi Mithridate, qui s'allia avec les pirates ciliciens. Mithridate appartenait à une dynastie dont le nom venait de Mithra, et il prétendait être un descendant de Persée. C'est probablement dans l'entourage du roi Mithridate – qui se piquait d'être un intellectuel et s'intéressait aux croyances religieuses grecques – que se tissa le lien entre Persée et Mithra.

Pourquoi le christianisme reste-t-il une des religions dominantes, alors que le mithriacisme a disparu (comme beaucoup d'autres cultes) ? À la différence du mithriacisme, qui était un culte secret, le christianisme est prosélyte : dès ses débuts, il chercha à convertir les incroyants. L'Évangile selon saint Matthieu, par exemple, s'achève par ces paroles de Jésus : « Allez donc : de toutes les nations, faites des disciples... » Au contraire, le mithriacisme était fondé sur le secret, et les secrets perdent leur attrait à mesure que le nombre de personnes qui les connaissent diminue. En outre, le mithriacisme attira des groupes d'individus – des soldats, des fonctionnaires, des marchands – dont le statut dépendait de l'ordre social de l'Empire ; la structure hiérarchique du culte de Mithra renforçait cet ordre. Au contraire, le christianisme était indépendant de l'Empire et opposé à la hiérarchie : ne prônait-il pas l'égalité devant Dieu et le détachement des biens de ce monde ? En outre, les premiers chrétiens (dont le statut social était souvent précaire) faisaient preuve d'un zèle révolutionnaire, totalement étranger aux adeptes du mithriacisme.

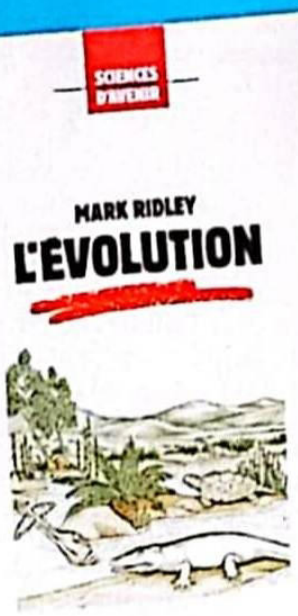
Alors que les premiers chrétiens cherchaient à éclairer le monde tout entier, les adorateurs de Mithra cherchaient une illumination personnelle et une progression au sein de l'ordre établi ; on comprend qu'ils aient adopté des pratiques qui limitaient le nombre des membres, par exemple, en excluant les femmes, en construisant de petits temples souterrains et en imposant de longues initiations.

La question essentielle n'est pas

3. LES TEMPLES MITHRIAQUES, souterrains, étaient présents dans l'ensemble de l'Empire romain. La majorité des vestiges ont été découverts en Italie, et le long du Rhin et du Danube, dans des zones de garnisons des légions romaines. Les fidèles du mithriacisme étaient surtout des soldats et des fonctionnaires.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990
© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

SCIENCES D'AVENIR

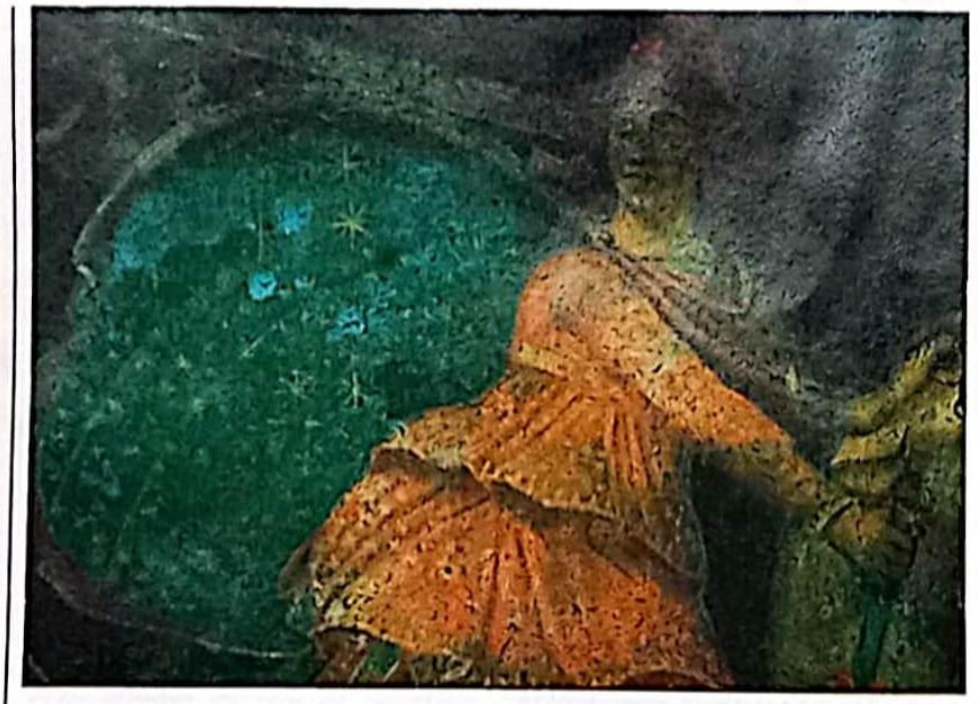


L'ÉVOLUTION

Quelques contradicteurs annoncent périodiquement la mort du darwinisme. Ce livre analyse avec lucidité leurs arguments... qui ne sont pas aussi révolutionnaires que leurs zélateurs le prétendent. Au contraire, les idées darwiniennes sont bien vivantes ; le darwinisme, comme toute science, s'adapte pour englober les nouvelles découvertes paléontologiques et biologiques : les problèmes non résolus, les questions ouvertes ne seront élucidés qu'à l'intérieur du contexte darwinien.

POUR LA SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande page 98 A



4. DANS CETTE MISE À MORT DU TAUREAU, datant du IIe siècle de notre ère, le dieu Mithra est dans une position (par rapport au taureau) qui coïncide avec celle de la constellation de Persée, par rapport à la constellation du Taureau. Le dieu Mithra semble avoir été forgé sur le modèle du héros grec Persée et, comme lui, est généralement représenté armé d'un glaive et coiffé d'un bonnet phrygien. Sur cette peinture trouvée en Italie, le manteau de Mithra enveloppe les étoiles et les planètes, symboles de son pouvoir sur le cosmos.

tellement de savoir pourquoi le mithriacisme ne s'est pas autant développé que le christianisme, mais pourquoi le christianisme a enthousiasmé les foules : vers la fin du IVe siècle, il avait quasiment éliminé les autres religions du monde méditerranéen.

Les raisons exactes du succès du christianisme font l'objet d'un débat animé, mais les spécialistes admettent généralement que le facteur le plus important fut le monothéisme : on n'est chrétien que si l'on abandonne tout autre culte religieux. Les autres religions de l'époque étaient moins exclusives : on pouvait être un initié de Mithra, aussi bien que d'Isis, sacrifier à Jupiter et vénérer simultanément un empereur défunt. À une époque où les références traditionnelles s'effondraient, la radicalité du christianisme attira de nombreux individus qui purent faire un choix décisif et croire que leur existence avait enfin un but et un sens. Alors que la confusion régnait, le christianisme offrait à ses fidèles une réelle identité.

On retrouve dans le christianisme certaines conceptions astrales qui intervenaient aussi dans le mithriacisme et d'autres cultes : Jésus est censé posséder un pouvoir sur les astres. L'Évangile selon Saint Marc, par exemple, commence par un récit du baptême de Jésus, qui « vit les cieux se déchirer ». Cette image indiquait que la vie de Jésus constituait une rupture de l'ordre cosmique et la manifestation d'une puissance supérieure à celle des cieux. Dans le même Évangile, Jésus prédit : « Mais en ces jours-là, après cette détresse, le Soleil s'obscurcira, la Lune ne brillera plus, les étoiles se mettront à tomber du ciel » ; et, plus loin : « Le ciel et la Terre passeront, mes paroles ne passeront pas. » La lettre de Paul aux Galates mentionne : « Et nous, de même, quand nous étions des enfants soumis aux éléments du monde, nous étions esclaves. Mais quand est venu l'accomplissement du temps, Dieu a envoyé son fils... » De même que Mithra bouleversait l'ordre de l'Univers en modifiant la course de la sphère céleste, Jésus représentait une rupture dans la structure du cosmos.

Comme beaucoup d'autres religions et de philosophies de cette période, le christianisme primitif et le mithriacisme exprimaient le besoin de croire en une puissance capable de dépasser les frontières du cosmos et d'ouvrir la voie à des royaumes transcendant l'expérience quotidienne. Cette aspiration était renforcée par les bouleversements sociaux et par l'effondrement des fondements culturels locaux. Simultanément les savants imaginaient des modèles célestes grandioses. Le monde moderne, avec la mondialisation de sa culture et l'expansion de l'astronomie, présente d'étonnants parallèles avec cette époque antique. ■

AFLM

ASSOCIATION FRANÇAISE DE LUTTE CONTRE LA MUCOVISCIDOSE

APPEL D'OFFRES 1990

Un appel d'offres concernant la recherche sur la mucoviscidose est ouvert pour 1990. Le Conseil Scientifique de l'AFLM souhaite susciter et soutenir tout particulièrement les **études coopératives.**

Les **thèmes prioritaires** (mais non exclusifs) retenus sont :

1. Etude des mutations et corrélations clinico-génétiques.

2. Biomembranes ; protéine CFTR et sa fonction ; modèles cellulaires ; transferts ioniques et processus sécrétoires : approche physiopathologique et pharmacologique.

3. Infections broncho-pulmonaires et interactions hôte/micro-organismes.

4. Recherche clinique : évaluation diagnostique et thérapeutique de l'atteinte respiratoire, transplantations, nutrition.

Les équipes intéressées devront se procurer des formulaires de demande en s'adressant à :

AFLM
Secrétariat scientifique
82, bd Masséna 75013 PARIS
Tél. : 45 82 25 25 Télécopie : 45 83 56 32

Deux types de formulaire sont disponibles : demande de subvention ou demande d'aides aux études. Ces dernières, d'une durée d'un an éventuellement renouvelable, s'adressent à de jeunes chercheurs titulaires d'un diplôme de 3e cycle ou de titres équivalents.

Les réponses à cet appel d'offres devront impérativement nous parvenir avant le **15 février 1990.**

Pr J. PICARD
Président du Conseil Scientifique

Dr P. FOUCAUD
Délégué Scientifique

Pr J. NAVARRO
Secrétaire Général du Conseil Scientifique

LA MUCOVISCIDOSE : EN PARLER, C'EST DEJA AIDER.

TOUR ANCONE : 82, bd Masséna - 75013 Paris - Tél. : (1) 45 82 25 25
Télécopie : 45 83 56 32 - CCP 617 426 W Paris

Reconnue d'utilité publique - Membre de l'Association Internationale contre la Mucoviscidose

D'où a été prise la photo ?

IAN STEWART

Où le lecteur examinera les rapports harmonieux entre la carte et le territoire.

Tante Cunégonde feuilletait l'album de photographies : « Comme Mélu était mignonne quand elle était petite ! On voit qu'elle aimait le gâteau au chocolat ! Elle s'en est barbouillé ses grosses joues bien rondes. »

Mélusine, « la petite fée du calcul », qui avait grandi depuis que la photo avait été prise, devint toute rouge et tenta de disparaître sous la table. Ces réunions de famille sont vraiment pénibles, pensait-elle : elles rappellent d'anciens incidents embarrassants, surtout quand on a 16 ans et encore des joues bien rondes. Mélu sortit de sa poche sa calculette et commença à développer e^{π} en fraction continue, histoire de passer le temps.

« Oh, oui, et regarde celle-là, dit Cunégonde. Regarde, Paul-Émile ! Paul-Émile ? Paul-Émile, réveille-toi ! C'est celle où tu portes cette toque de fourrure, à la fête du Nouvel An des Hemcédeux (M.O).

– J'ai arrêté de porter une toque de fourrure, remarqua Paul-Émile d'un ton maussade. Je n'ai plus assez de cheveux et les gens croient que j'ai mis une perruque.

– Cette photographie *(voir la figure 1)* me rappelle des souvenirs, dit Cunégonde. C'est Paul-Émile qui l'a prise pendant ses vacances, l'année dernière. Où était-ce, Paul-Émile ?

– À Paris.

– Oui, mais où à Paris, Paul-Émile ? »

Paul-Émile se redressa sur sa chaise, frotta ses yeux, chaussa ses lunettes et examina la photographie.

« Je ne me souviens plus, dit-il.

– Si c'est Paris, alors la rivière doit être la Seine, dit Mélu.

– Je pense que c'était du sommet de l'Arc de Triomphe, dit Paul-Émile, sans conviction. Ou peut-être du toit de la maison de Radio-France.

1. Panorama parisien... mais d'où la photo fut-elle prise ?

– Ne sois pas stupide, dit Déborah, la mère de Mélu, tu peux voir l'immeuble de Radio-France sur la droite, à demi caché.

– Je vais chercher une carte. »

Paul-Émile sortit de la pièce. Pendant plusieurs minutes, on put entendre des bruits d'objets déplacés, ponctués de jurons. Il réapparut, apoplectique mais triomphant, brandissant une grande carte de Paris. Toute la famille l'entoura de si près qu'il eut quelque mal à mettre la carte à plat, mais en fin de compte *(voir la figure 2)* ils identifièrent les trois ponts de la photographie : le pont de Bir Hakeim, le pont du métro qui part de l'avenue du Président-Kennedy et le pont de Grenelle.

« Je pense que je peux deviner maintenant, dit tante Cunégonde tout excitée !

– Tout le monde peut deviner, dit Déborah, sarcastique. Il est assez facile de deviner ; la question est de savoir si l'on a deviné juste.

– Maman a raison, s'exclama Mélu. N'oubliez pas que le centre de la photographie peut ne pas être la direction de visée de l'appareil photographique. Il s'agit d'un agrandissement et il a pu être recadré.

– Paul-Émile, concentre-toi ! Tu as pris cette photo, tu dois te souvenir de quel endroit », dit Cunégonde avec son habituel optimisme autoritaire.

Mais Paul-Émile s'était déjà rendormi et il était, dans son sommeil, si pathétiquement heureux que personne n'osa l'éveiller.

« Mélu, dit Déborah, a étudié la géographie à l'école ! Elle devrait pouvoir nous aider.

– Je ne pense pas que la géographie puisse nous aider, répondit Mélu.

– Oh, dit tante Cunégonde, déçue. Une enfant d'ordinaire si intelligente et qui a été si bien nourrie, si bien éduquée...

– Mais, coupa Mélusine, les mathématiques peuvent nous aider ! »

Le visage de tante Cunégonde se teinta d'inquiétude, mais elle retrouva son courage après une rapide lampée de liqueur de cassis.

« Comment cela, Mélu chérie ? C'est une question de photographie !

– Non, c'est une question de géométrie projective, des plus intéressantes d'ailleurs, rétorqua Mélu.

– Qu'est-ce que la géométrie projective, chérie, demanda Déborah ?

– Eh bien, maman, tu sais que si tu regardes une assiette de travers, elle ne te semble plus circulaire, mais ovale ?

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

– Vraiment ? Je n'ai jamais remarqué cela.

– C'est parce que tu es tellement habituée à voir de travers des objets circulaires que ton cerveau compense inconsciemment. Regarde bien cette assiette, objectivement. »

Déborah plissa ses paupières et loucha.

« Mais c'est vrai ! Elle est beaucoup plus longue que large !

– Exactement. Elle s'aplatit et, au lieu de voir un cercle, tu vois une ellipse. C'est parce que la forme circulaire est projetée sur la rétine de l'œil *(voir la figure 3)*. Il en va de même lorsque l'on photographie. Les cercles ne restent pas en général circulaires dans une projection, ainsi le concept de « cercle » n'est pas une bonne notion en géométrie projective ; les concepts intéressants sont ceux qui sont invariants par projection.

– Oh, dit Déborah. Paul-Émile, tu as entendu ça ? N'est-ce pas intéressant ? »

Paul-Émile ronfla bruyamment.

« Hum. Mélu.

– Oui, maman ?

– Quelles sont ces choses invariantes par projection ?

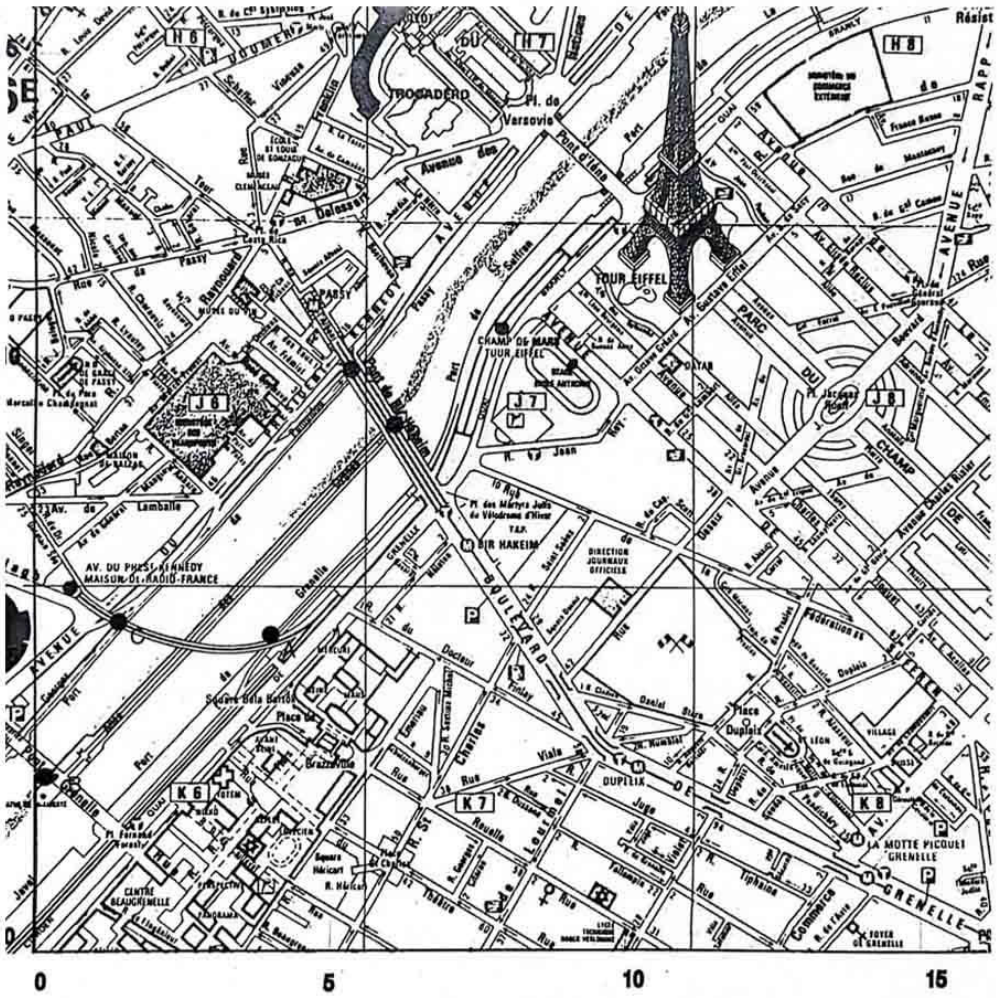
– Ni les angles, ni les longueurs, ni les surfaces, maman. Ni même les droites parallèles. Un concept important en géométrie projective est celui de section conique, dit Mélu.

– Section comique ? Comme dans le *Journal du dimanche* ? J'adore Hagar, Peanuts, les Frustrés...

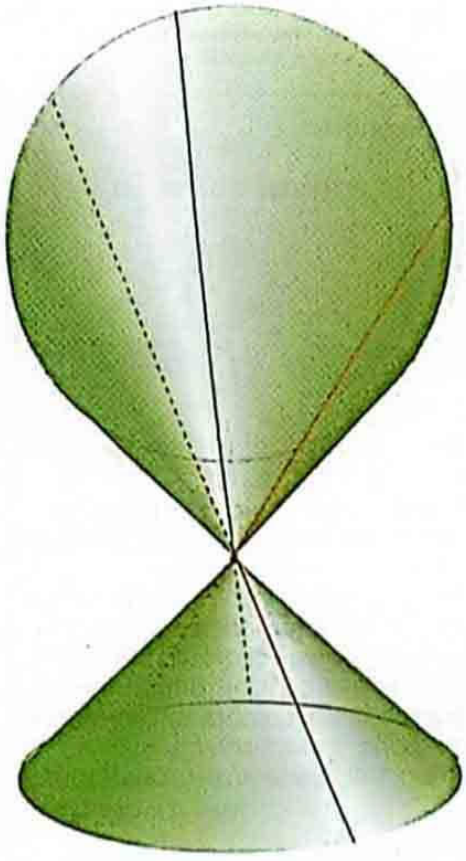
– Non, tantine. Section conique, ou simplement coniques. Ce que l'on obtient quand on coupe un cône par un plan. En géométrie ordinaire, il y a deux coniques fondamentales : l'ellipse et l'hyperbole *(voir la figure 4)*. Et aussi quelques types plus particuliers de coniques – la parabole, le cercle, la paire de droites, la droite double et même le point – qui sont des coupes spéciales.

« Si l'on projette une conique quelconque, on obtient toujours une autre conique, car il s'agit toujours de la projection d'un cercle : les diverses coniques ne sont donc que des cercles projetés, et c'est pour cela que les assiettes paraissent elliptiques.

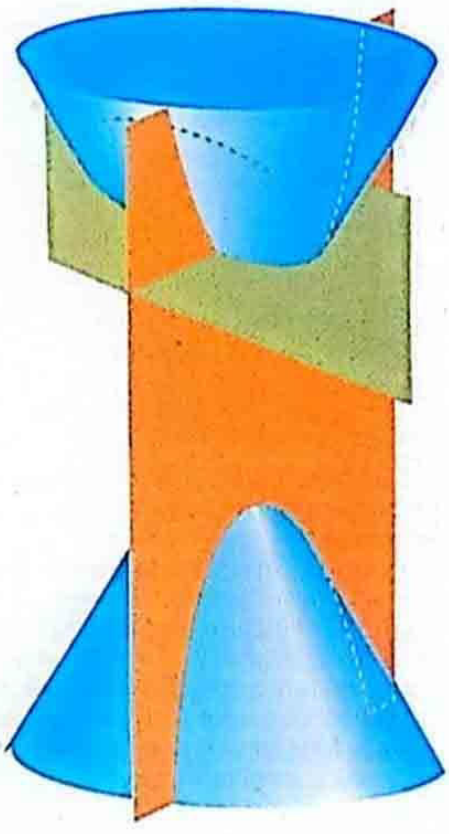
« J'ai dit que les distances ne sont pas conservées par projection (songez aux rayons du cercle) et les rapports de distances non plus. Par exemple, le segment bleu de la figure 5a est divisé en deux parties dont l'une est double de l'autre. Après projection, on obtient le segment rouge dont les deux parties ne sont plus dans le



2. Carte de la zone de la photographie marquée des points *A, B, C, D, E* qui seront utilisés par la suite.



3. La projection d'un cercle, tel que le réalise l'œil ou un objectif photographique, est une ellipse.



4. Les deux coniques fondamentales, l'ellipse et l'hyperbole, sont des sections planes d'un cône. Notez que l'hyperbole a deux branches.

même rapport. En fait, étant donné deux ensembles de trois points alignés *ABC* et *A'B'C'*, on peut toujours trouver une projection qui transforme un rapport en un autre *(voir la figure 5b)*. Aussi, tant que l'on reste en géométrie projective, on ne peut tirer d'information d'un triplet de points.

– Je n'en ai jamais eu l'intention, dit Cunégonde.

– Pour quatre points, c'est une autre affaire, dit Mélu. Si ces points sont alignés, il existe un invariant projectif : le birapport. Par « invariant », j'entends qu'il n'est pas changé par projection. Il existe aussi un birapport pour tout faisceau de droites, c'est-à-dire tout système ordonné de quatre droites concourantes *(voir l'encadré 1)*.

– Quand j'étais une petite fille, à l'école, dit Cunégonde, la géométrie parlait de théorèmes, pas de photographies. C'étaient des choses sans rapport. Ni birapport d'ailleurs. Mélusine chérie, énonce-nous un théorème de cette géométrie projective.

– Si tu insistes, tantine. En voici un particulièrement élégant : il est appelé théorème de Chasles. Prends une conique – quelconque – et quatre points arbitraires *A, B, C, D* de cette conique. À présent choisis *P* où tu veux sur la conique et joins-le à *A, B, C, D* pour former un faisceau. Le théorème dit que le birapport du faisceau ne dépend pas du point *P (voir la figure 7)*. Et tu remarqueras que les concepts en jeu : coniques, faisceaux et birapports sont utiles en géométrie projective.

– Superbe, dit Cunégonde.

– Et moi, quand j'étais petite fille, dit Déborah, réagissant tardivement au mot « théorème », nous devions étudier d'horribles choses appelées démonstrations – « Les triangles *ABC* et *XYZ* sont égaux, car ils ont tous les deux trois côtés » – terriblement difficiles.

– Maman, j'ai démontré, pour te faire plaisir, le théorème de Chasles dans l'encadré 2.

– Merci ma chérie. Continue, c'est fascinant.

– Bien, d'ailleurs je ne vous ai pas dit le plus beau. Le théorème de Chasles énonce aussi que la réciproque est vraie. Si l'on fixe quatre points *A, B, C, D* et si l'on envisage les faisceaux de droites de sommet *P* dont les rayons passent dans l'ordre par *A, B, C, D* et dont le birapport a une valeur constante arbitraire fixée, alors *P* est situé sur une conique passant par *A, B, C, D*. Il existe une telle conique pour chaque valeur du birapport. C'est cette version du théorème de Chasles qui nous aidera à trouver d'où la photo a été prise. »

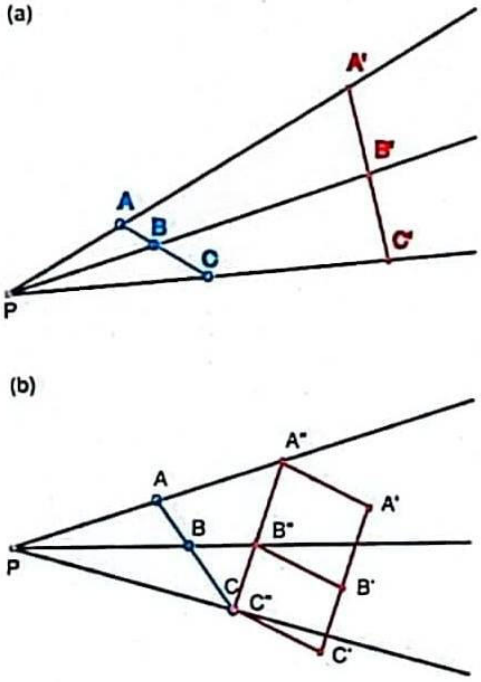
Déborah opina de la tête.

« Bien entendu.

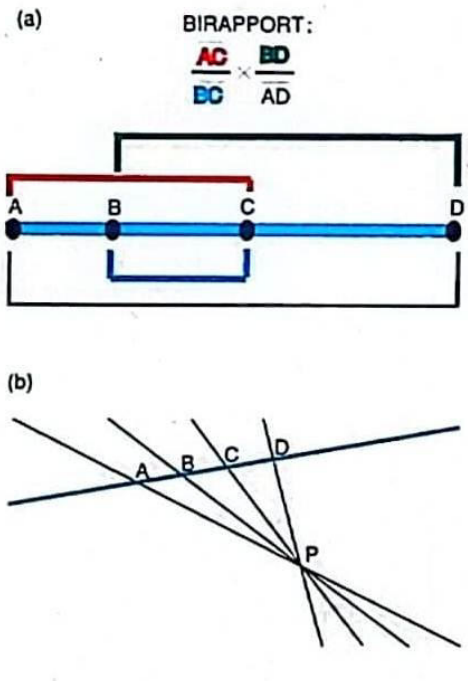
– Vois-tu comment, maman ?

– Eh bien, dit-elle mal à l'aise, pas exactement comment, mais j'ai saisi l'idée générale.

– Je vais t'expliquer. Je ne vais pas chercher à quelle hauteur au-dessus du sol s'est faite la prise de vue, mais simplement essayer d'en repérer la position sur la carte. En d'autres termes, nous travaillerons dans un plan. La photographie n'est qu'une projection. Commençons par choisir



5. *(a)* Une projection ne conserve pas les longueurs. *BC* est deux fois plus long que *AB*, mais *B'C'* est plus court que *A'B'*. *(b)* Les rapports des longueurs formées par deux ensembles quelconques de trois points alignés peuvent être mis en concordance par projection.



6. *(a)* Le birapport de quatre points alignés. *(b)* Le birapport d'un faisceau de quatre droites passant par *P* s'obtient en prenant le birapport des quatre points (dans le même ordre) d'intersection avec une sécante. Ce birapport ne dépend pas de la sécante.

Encadré 1 : le birapport

Pour quatre points alignés, *A, B, C, D*, envisagés dans cet ordre, on définit leur birapport *r* :

$$r = \frac{\overline{AC}}{\overline{BC}} \times \frac{\overline{BD}}{\overline{AD}}$$

Si les points sont projetés en , *A', B', C', D'*, ces projections sont alignées et leur birapport

$$r' = \frac{\overline{A'C'}}{\overline{B'C'}} \times \frac{\overline{B'D'}}{\overline{A'D'}}$$ est inchangé, c'est à dire $r' = r$.

En particulier, ce birapport est inchangé si vous prenez une photographie de ces points, et ce quel que soit le point d'où vous la prenez.

Pour un faisceau de quatre droites concourant en *P* (*voir la figure 6b*) et ordonnées, on définit un birapport, simplement en le coupant par une droite quelconque en *A, B, C, D* (dans l'ordre des droites), puis en utilisant la formule donnant *r* ci-dessus. Il ne dépendra pas de la sécante choisie puisque le birapport des points est invariant par projection (et, en particulier, par celle de centre *P*).

Une formule donne le birapport d'un tel faisceau en fonction de ses seuls angles, à savoir :

$$r = \frac{\sin APC}{\sin BPC} \times \frac{\sin BPD}{\sin APD}$$

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

sur la photographie quatre points *A', B', C', D'* que l'on sache localiser avec précision sur la carte : l'extrémité gauche du pont du métro *(point A sur la carte de la figure 2)*, le milieu du pont de Grenelle *(B)*, l'extrémité gauche du pont du métro *(C)* et le milieu du pont de Bir Hakeim *(D)*. Calculons le birapport de ces quatre points en mesurant les distances horizontales (obtenues par projection) séparant les points correspondants *A', B', C', D'* sur la photographie. D'après ma calculette, le birapport est égal à 1,206 *(voir l'encadré 3)*.

« Considérons à présent les points correspondants *A, B, C, D* sur la carte, et désignons par *P* le centre de l'objectif. Nous savons que le faisceau de sommet *P* passant par *A, B, C, D* a aussi un birapport de 1,206.

– Pourquoi ?

– Mais parce que la photographie est une projection des positions sur la carte et que nous avons déjà vu que les projections conservent le birapport.

– Oh, exact.

– Et, d'après le théorème de Chasles, cela signifie que *P* doit être sur une certaine conique ; nous allons calculer quelle est cette conique et la dessiner sur la carte. »

Déborah réfléchit.

« Oui, mais cela ne précisera pas la position de *P*, qui peut être n'importe où sur cette conique.

– Tout à fait, mais suppose que nous trouvions une autre conique sur laquelle le point *P* soit aussi.

– Astucieux ! Alors *P* sera où les coniques se coupent. C'est un peu comme une recherche de la situation d'un émetteur radio. D'un premier point, on détermine une droite, d'un second une autre droite, et l'émetteur doit être à leur intersection !

– Exactement. Seulement nous utilisons des courbes.

– Je vois. Ainsi nous devons trouver quatre autres points sur la photographie que nous sachions repérer avec précision sur la carte.

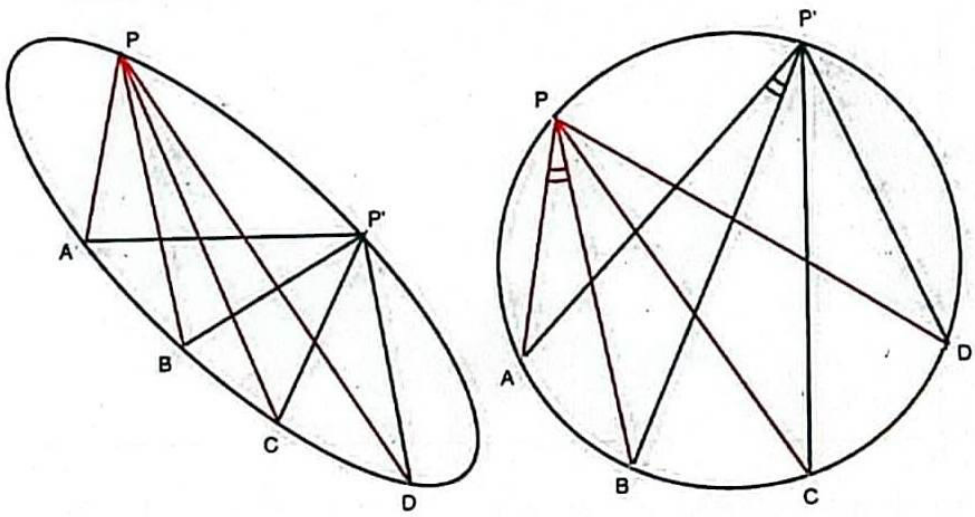
– Non. Un seul point suffit. »

Déborah réfléchit un moment et acquiesca de la tête, mais Cunégonde resta dubitative.

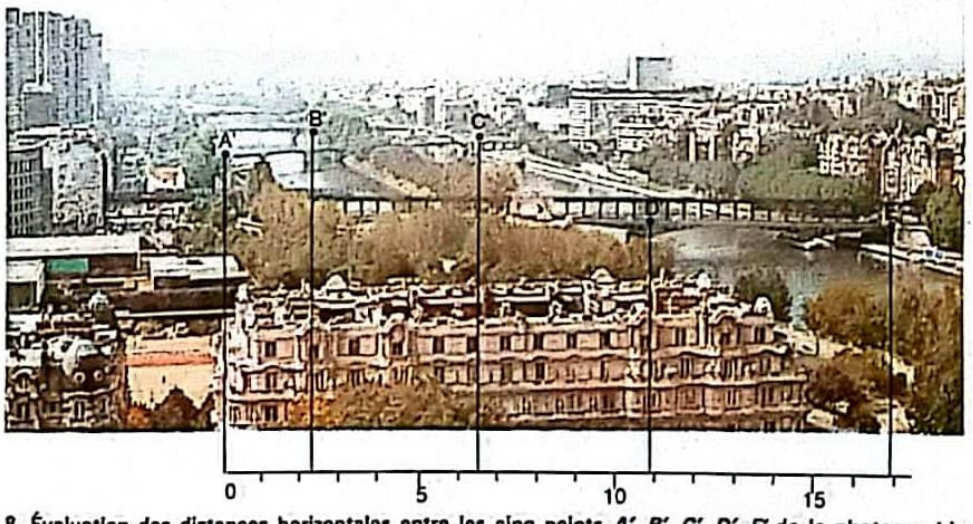
« Regarde, tantine. Choisissons l'extrémité droite du pont de Bir Hakeim *(point E de la figure 2)*. À présent, nous considérons les quatre points *A, B, C, E* ; les points *A, B, C* ont déjà été utilisés, mais le quatrième est différent, et c'est tout ce qui importe. Sur la photographie, les points *A', B', C', E'* correspondants ont pour birapport 1,305 : il suffit de reprendre le calcul de l'encadré 3 en

Encadré 2 : Théorème de Chasles

C'est un bel exemple d'utilisation de la géométrie ordinaire pour démontrer des théorèmes de géométrie projective. Commençons par projeter la conique sur un cercle. Le birapport étant un invariant projectif, il suffit de démontrer le théorème dans ce cas particulier. Nous avons à prouver qu'étant donné quatres points fixes *A, B, C, D* d'un cercle et un point *P* mobile sur ce même cercle, le birapport du faisceau de droites *PA, PB, PC, PD* ne dépend pas de *P* (*voir la figure 7*). Dans l'encadré 1, nous avons vu une formule exprimant ce birapport en fonction des seuls angles *APC, BPD, BPC* et *APD*. Or, ces angles ne dépendent pas de la position du point *P* (*voir la figure 7b*), car ils interceptent le même angle.



7. Le théorème de Chasles : les faisceaux issus de *P* et de *P'* ont même birapport. Pour le démontrer, on projette la conique sur un cercle, ce qui ne change pas le birapport. Sur le cercle, la démonstration est évidente, les angles correspondants dans les deux faisceaux étant égaux.

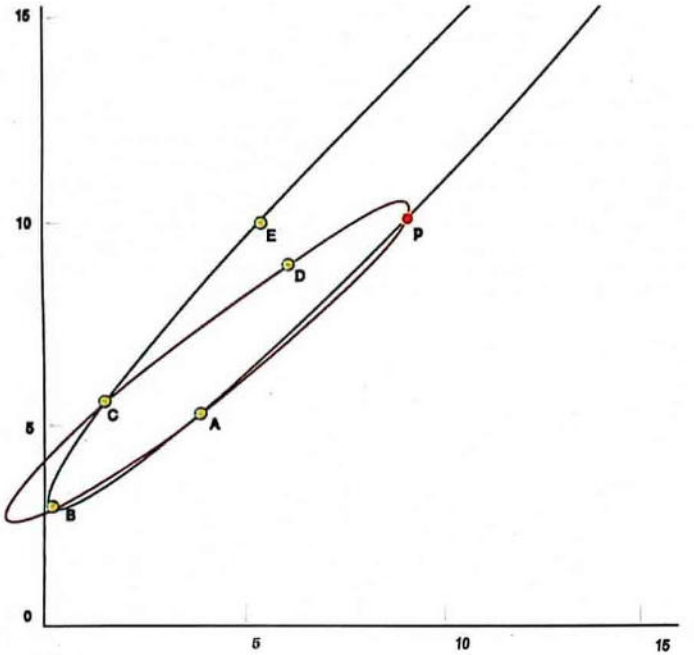


8. Évaluation des distances horizontales entre les cinq points *A', B', C', D', E'* de la photographie correspondants aux points *A, B, C, D, E* de la carte *(voir la figure 2)*.

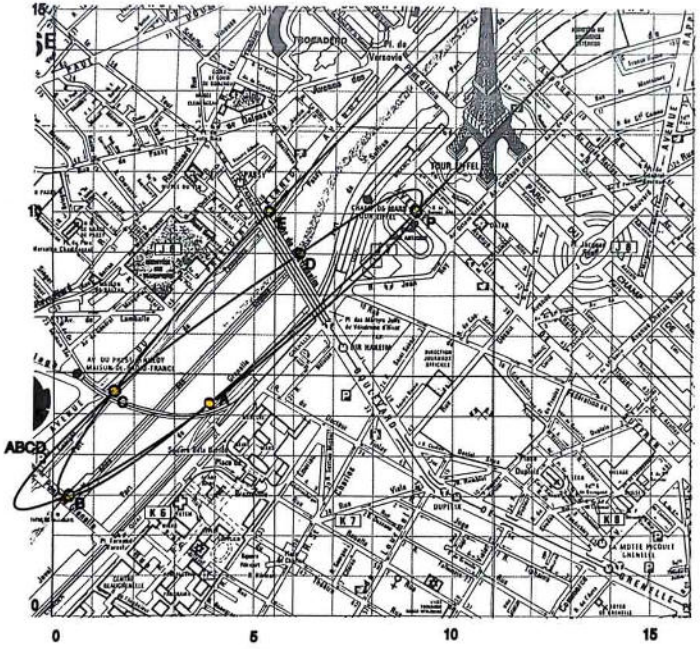
Encadré 3 : Calcul du birapport à partir de la photographie

Pointez les quatre points *A', B', C', D'* correspondant à *A, B, C, D*, comme cela a été fait sur la figure 8. Leurs distances horizontales à partir de la gauche sont 2,2 ; 6,5 ; 10,9 ; 16,9 (l'unité est arbitraire) ; le birapport vaut :

$$\frac{\overline{A'C'}}{\overline{B'C'}} \times \frac{\overline{B'D'}}{\overline{A'D'}} = \frac{6,5}{4,3} \times \frac{8,7}{10,9} = 1,206$$



9. Tracé des deux ellipses correspondant aux ensembles de points *ABCD* et *ABCE*. Elles se coupent en *A*, *B* et *C*, comme il se doit, et on un quatrième point, *P*, qui est la position de l'objectif.



10. La figure 9 surimposée sur la figure 2. Le photographe semble avoir été tout près de l'avenue de Suffren.

Encadré 4 : Le calcul de la position de l'objectif

Utilisant les coordonnées sur la carte précisées sur la figure 2, nous noterons (x,y) la position cherchée P de l'objectif et dresserons la table des coordonnées (x_A, y_A), etc. des points A, B, C, D:

x_A : 3,9	y_A : 5,3
x_B : 0,4	y_B : 3,0
x_C : 1,5	y_C : 5,6
x_D : 6,1	y_D : 9,0

Introduisons les expressions $L_{AB} = (y_A - y_B)x - (x_A - x_B)y + x_A y_B - x_B y_A$ et les expressions L_{AC}, L_{DB}, L_{DC} similaires.

$$L_{AB} = 2{,}3x - 3{,}5y + 9{,}58$$
$$L_{AC} = -0{,}3x - 2{,}4y + 13{,}89$$
$$L_{DB} = 6x - 5{,}7y + 14{,}7$$
$$L_{DC} = 3{,}4x - 4{,}6y + 20{,}66$$

Pour un birapport donné r, on démontre, en géométrie analytique, que la conique des positions possibles P admet pour équation :
$(r-1)L_{AC}L_{DB} - rL_{AB}L_{DC} = 0$:

changeant tous les D en E. Ainsi nous savons que P est aussi sur l'unique conique passant par A, B, C, E et pour laquelle le birapport est égal à 1,305.

– Brillant ! À présent, tout ce qui tu as à faire est de trouver les deux coniques.

– Cela peut prendre quelque temps », dit Mélu, et elle disparut dans sa chambre.

Elle en ressortit deux heures plus tard, avec l'encadré 4, qu'elle commença à nous expliquer.

« ... Ainsi la photographie doit avoir été prise du point de coordonnées 9,0 et 10,1, conclut-elle triomphalement.

– Qui est ?

– Eh bien... Il semble que ce soit le début de l'avenue de Suffren *(voir la figure 11)*.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

la position de l'objectif

Nous savons que $r = 1{,}206$; aussi l'équation de la conique s'écrit :

$$-9{,}802\,x^2 + 24{,}497\,xy - 16{,}598\,y^2 - 80{,}329\,x + 116{,}775\,y - 196{,}633 = 0.$$

Traçons ensuite cette courbe dans un repère choisi, par exemple en donnant des valeurs à x et résolvant l'équation résultante en y, qui est du second degré. Cette conique est représentée sur la figure 10 ainsi que la conique obtenue en remplaçant A, B, C, D par A, B, C, E et dont l'équation – résultant de calculs analogues – est :

$$-13{,}969\,x^2 + 27{,}539\,xy - 14{,}554\,y^2 - 73{,}711\,x + 91{,}346\,y - 144{,}352 = 0.$$

Les deux courbes sont des ellipses ; elles se coupent en quatre points, dont trois sont bien entendu A, B et C : le quatrième est la position P de l'objectif. Par mesure directe sur le repère, on obtient $(x,y) = (9{,}0\,;\,10{,}1)$ pour P. Mélu n'a plus qu'à reporter ce point sur la carte.

– C'est une rue proche de la tour Eiffel, tantine.

– C'est ce que j'avais deviné, dit tante Cunégonde.

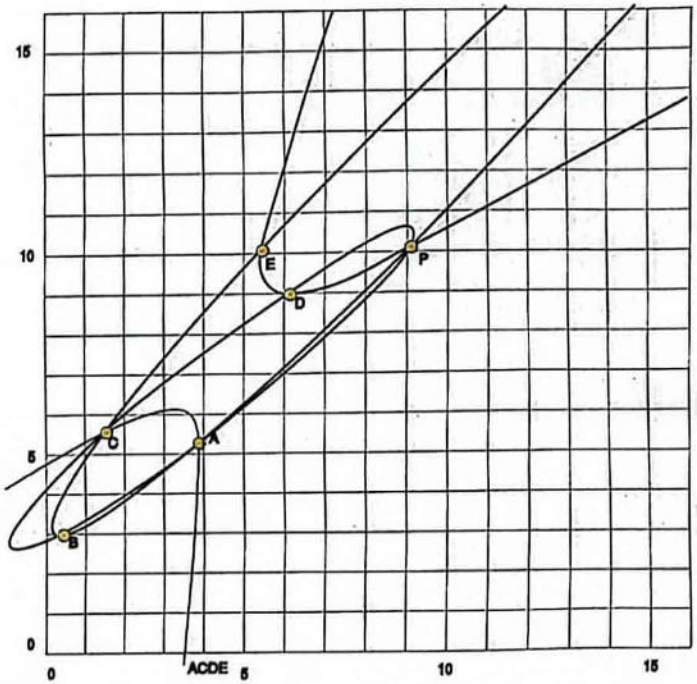
– L'avenue de Suffren, demanda Déborah ?

– Non, la tour Eiffel.

– Bravo, belle intuition, tantine. Mais le calcul, lui, prouve ce résultat. Avec une petite incertitude qui ne doit pas nous surprendre étant donné la difficulté de localiser exactement les points sur la carte. De plus, la méthode est assez sensible aux petites erreurs de mesure. Du beau travail quand même ! »

Très agitée, elle agitait à bout de bras sa calculette.

« Et je peux refaire les calculs à partir de mesures plus précises.



11. Quand on utilise les points *A, C, D, E*, la conique est une hyperbole : elle confirme la position de *P*. On a représenté ici cette hyperbole et les deux ellipses de la figure 9.

– Non ! Non, la supplia sa mère ! Merci beaucoup Mélu. Je trouve que ces deux ellipses sont bien proches l'une de l'autre. Cela rend la détermination du point P d'intersection assez imprécise.

– Oui, je pourrais essayer d'autres ensembles de quatre points. Il serait peut-être préférable de choisir *A, C, D, E*. »

Est-ce préférable ? Essayez de mener à bien ce calcul vous-mêmes, si vous avez une heure à lui consacrer, et comparez votre résultat avec celui de Mélu.

À ce moment, Paul-Émile remua dans son sommeil, renifla et sauta sur ses pieds.

« Je me souviens, cria-t-il ! Tout me revient. J'ai pris la photographie du premier étage de la tour Eiffel !

– Nous savons cela, très cher, dit Déborah.

– Comment avez-vous pu...

– Mélu l'a calculé, dit Cunégonde.

– Mais, je ne vois pas...

– Eh bien, papa, expliqua Mélusine, c'est une question de géométrie projective, des plus intéressantes d'ailleurs... »

Réponses

Si vous utilisez les points *A, C, D, E*, alors le birapport vaut 1,524 et la conique a pour équation :
$-8{,}081\,x^2 + 16{,}772\,xy - 2{,}420\,y^2 - 50{,}702\,x - 42{,}361\,y + 266{,}466 = 0.$

Cette fois, c'est une hyperbole. Elle est représentée *(voir la figure 11)* dans le même repère que les deux ellipses. Remarquez qu'elle passe aussi par $(9{,}0\,;\,10{,}1)$, confirmant ainsi notre premier résultat, mais elle a l'avantage de couper la première ellipse (et la seconde ellipse aussi d'ailleurs) sous un angle plus grand, ce qui facilite la détermination précise du point P d'intersection.

Il y a cinq ensembles différents de quatre points dans l'ensemble *A, B, C, D, E* (puisque choisir quatre points c'est en choisir un), de sorte que si vous le dessinez, vous pouvez trouver deux autres coniques passant par P. Il y a alors dix paires de coniques, chacune offrant une estimation de la position de P. N'y aurait-il pas une combinaison – comme, par exemple, la moyenne – de ces dix réponses dont l'erreur soit plus faible ? ■

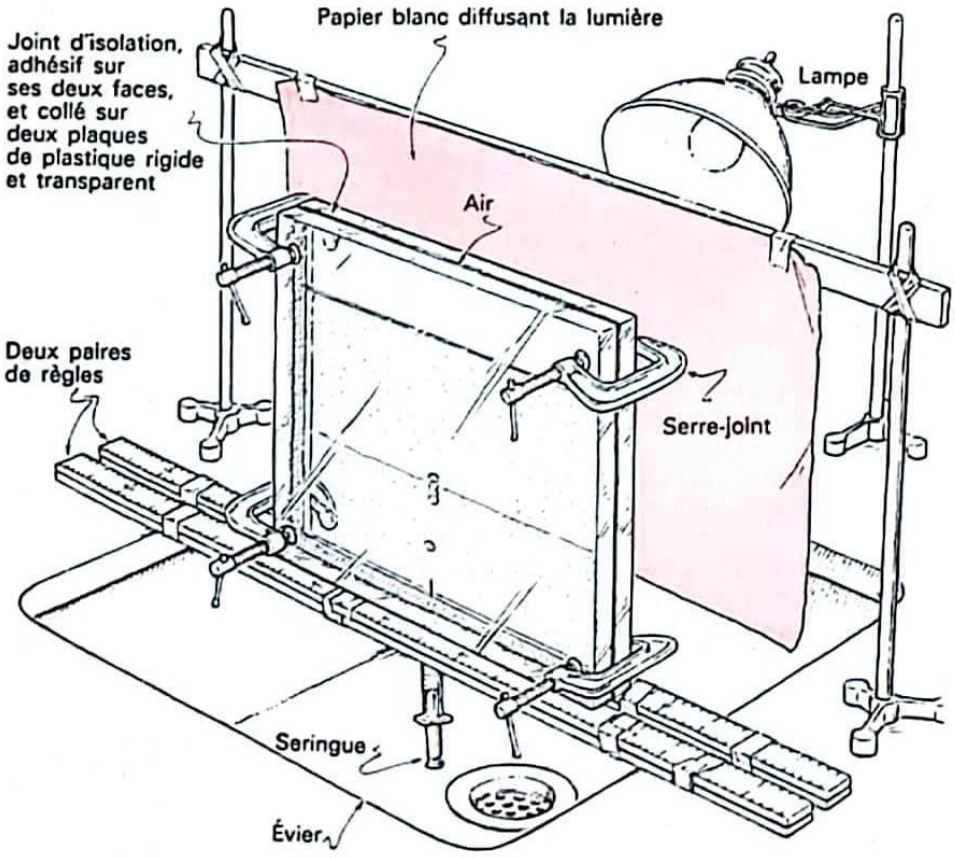
© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

Ascension de l'air

JEARL WALKER

Des bulles d'air jouent à chat dans les liquides visqueux.

Les bulles d'air qui montent lentement vers la surface d'un fluide visqueux ont parfois des formes étranges. On ignore souvent leur comportement, car les liquides visqueux ne sont pas toujours transparents. Au début du siècle, un ingénieur anglais, Henry Hele-Shaw, a conçu un dispositif que l'on peut utiliser pour observer ces bulles d'air tout en simplifiant leurs interactions. Une cellule de Hele-Shaw est constituée de deux plaques transparentes, séparées l'une de l'autre par un joint étanche ; à l'aide d'une seringue traversant le joint, on introduit les bulles d'air, qui se déplacent sous l'action des forces de pesanteur et de la poussée d'Archimède quand la cellule est verticale. On peut aussi disposer la cellule horizontalement et provoquer l'écoulement du liquide à l'aide de pistons.



1. Le dispositif expérimental avec la cellule de Hele-Shaw.

Avec un tel dispositif, on suit aisément le déplacement des bulles, même quand le liquide est opaque, car la couche de liquide est très mince. Le déplacement des bulles se fait dans deux directions, et on l'analyse plus facilement qu'à trois dimensions, dans un récipient plus volumineux.

On a beaucoup utilisé les cellules de Hele-Shaw pour étudier les mécanismes de formation des bulles et d'écoulement des fluides ; mais c'est seulement en 1986 que l'on a remarqué certains aspects étranges de ces bulles : Tony Maxworthy, de l'Université de Californie du Sud, a injecté une série de bulles, une à une, dans une huile de silicone visqueuse, et observé que ces bulles se mettaient en file et montaient vers la surface comme les wagons d'un train. Parfois ces « piles de bulles » sont instables : la bulle de tête se divise, puis la deuxième, puis la troisième et ainsi de suite, à mesure que la pile monte dans le liquide ; la pile tout entière finit par se dissocier.

Ultérieurement, T. Maxworthy et d'autres chercheurs ont étudié les formes des bulles d'air qui montent dans la glycérine ou d'autres fluides visqueux, dans une cellule de Hele-Shaw. Contrairement à ce que l'on croit, les forces de tension superficielle ne confèrent pas toujours aux cellules une forme sphérique ou ovale ; parfois les bulles ont des formes étranges... mais stables.

J'ai voulu savoir si un amateur pouvait étudier ces piles de bulles sans matériel spécialisé : dans un magasin de bricolage, je me suis procuré deux plaques carrées de plastique dur et transparent, d'une quarantaine de centimètres de côté et d'environ deux centimètres d'épaisseur. Pour séparer les plaques, j'ai utilisé des bandes adhésives avec lesquelles on calfeutre les fenêtres : j'ai collé une bande sur toute la longueur de trois des côtés de l'une des plaques et deux petits morceaux sur le quatrième côté, de façon à y ménager une large ouverture centrale pour le passage de l'air. Puis j'ai posé la plaque sur une table, et j'ai versé un peu de liquide dessus, afin de couvrir la moitié de la surface délimitée par les bandes. Enfin j'ai appliqué la seconde plaque sur la première et je les ai solidarisées avec quatre serre-joints placés près des quatre coins. Avec ce système, l'épaisseur du fluide est environ égale à un millimètre, mais elle n'est pas

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

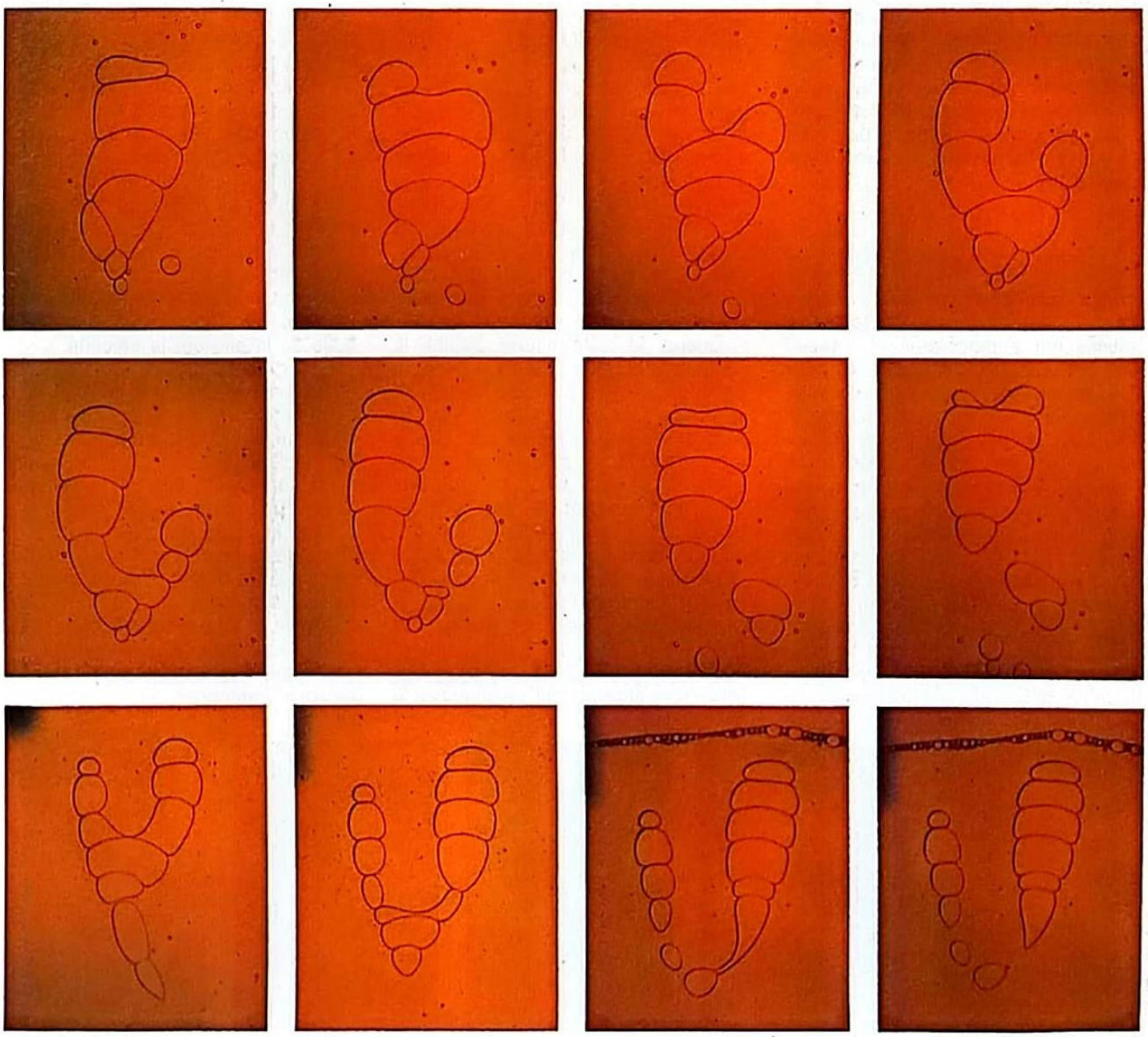
constante, car la pression n'est pas uniforme.

J'ai disposé l'ensemble verticalement, l'ouverture en haut, afin que les bulles remontent entre les plaques. Comme certains liquides fuient, je vous conseille de faire vos expériences au-dessus d'un évier. C'est ce que j'ai fait en utilisant quatre règles en plastique, regroupées par deux à l'aide de ruban adhésif : j'ai placé ces deux supports rigides un peu espacés en travers de l'évier et j'ai posé dessus la cellule de Hele-Shaw *(voir la figure 1)*. J'ai éclairé l'ensemble avec un projecteur placé derrière la cellule, en interposant entre la cellule et le projecteur une grande feuille de papier blanc qui diffusait la lumière.

Au début de l'expérience, quelques bulles piégées au moment de la fixation de la deuxième plaque sont déjà présentes ; elles apparaissent cernées d'un trait noir, tandis que l'intérieur de la bulle et l'ensemble du liquide sont uniformément éclairés. Ces lignes noires correspondent à la réfraction des rayons lumineux qui traversent la surface courbe des bulles : les rayons lumineux qui parviennent à la surface des bulles sont déviés hors du champ de vision. Lorsque l'éclairage est correct, les contours sont aussi nets que des traits de crayon.

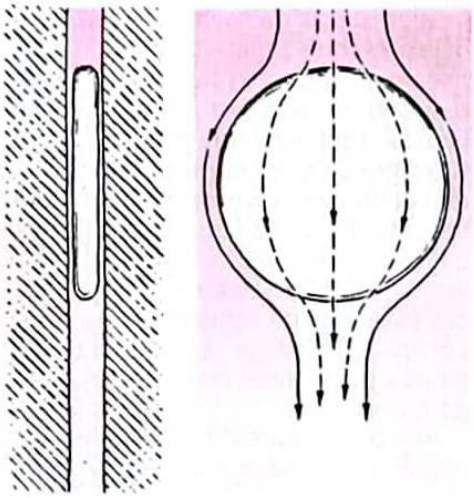
Afin d'introduire d'autres bulles, j'ai piqué une seringue remplie d'air dans le joint inférieur. En appuyant progressivement sur le piston de la seringue, j'ai introduit de l'air et formé une grosse bulle qui, après s'être détachée de l'aiguille, remonta progressivement dans le liquide. Toutefois j'ai eu beaucoup de mal à former des petites bulles, car la résistance du liquide impose de presser fortement sur le piston ; la résistance cède brusquement et l'on injecte presque toujours plus d'air qu'on ne le souhaite. Je me suis aperçu qu'en retirant un peu le piston, avant que la bulle ne se détache, on obtient les petites bulles désirées.

J'ai photographié les bulles avec un objectif de 35 millimètres équipé pour la macrophotographie. Seul le projecteur situé derrière la cellule était allumé lors des prises de vues. La viscosité des fluides étant assez élevée et les parois de la cellule très rapprochées, les bulles se déplaçaient lentement dans la cellule, de sorte que j'avais le temps de faire la mise au



2. Série de photographies montrant *(de gauche à droite et de haut en bas)* la séparation puis la réapparition d'une pile de bulles.

3. Traînées laissées par les bulles.



4. Formation d'une traînée.

point et de les photographier avant qu'elles ne se déplacent trop.

J'ai testé divers liquides visqueux : de la glycérine, des liquides pharmaceutiques ou alimentaires. Chaque fois qu'un liquide était conditionné dans un flacon transparent, je le retournais pour observer l'ascension des bulles d'air : j'ajoutais à ma collection tous les fluides dans lesquels l'ascension était lente.

Avant de voir ce qu'un amateur peut obtenir, examinons les phénomènes découverts par T. Maxworthy dans l'huile siliconée. Lorsque les bulles sont superposées et forment une pile, elles sont séparées les unes des autres par une mince couche d'huile. Parfois cette couche se rompt, les deux bulles coalescent et se fondent en une seule grosse bulle.

Quand la pile tout entière ne se fond pas en une seule grosse bulle, elle devient parfois instable, et la face supérieure de la bulle supérieure, qui est normalement convexe, s'aplatit progressivement, puis s'incurve vers le bas. Cette instabilité apparaît, car un fluide peu dense (l'air) est recouvert par un fluide dense (l'huile), à l'endroit de la surface supérieure. Tant que les forces de tension superficielle maintiennent la convexité de la bulle, elles empêchent l'huile de pénétrer dans la bulle. Cependant, à mesure que la bulle monte dans l'huile, elle crée de petites vagues juste devant elle et dès que l'une d'elles perturbe suffisamment l'équilibre des forces sur la face supérieure de la bulle, celle-ci commence à s'enfoncer. Le même phénomène se produit lorsque la première bulle de la pile s'approche d'une petite bulle quasi immobile : la pression du fluide augmente rapidement entre les deux bulles et devient suffisante pour que la paroi supérieure de la grosse bulle s'enfonce.

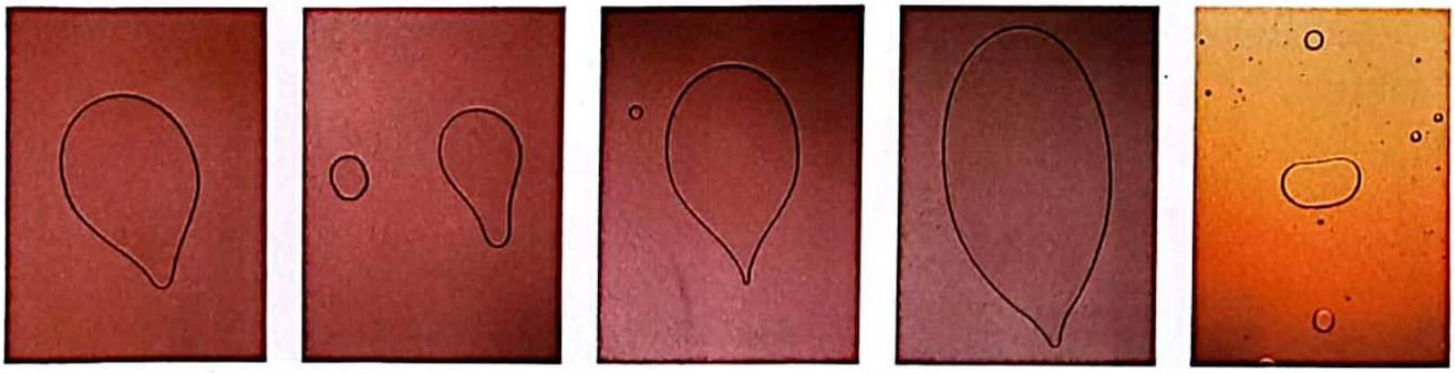
Quand la déformation atteint la paroi inférieure de la bulle supérieure de la pile, cette bulle se sépare en deux ; puis les bulles suivantes subissent une à une le même sort que la première et la pile se divise progressivement. Les deux piles ainsi formées sont généralement de tailles différentes, et la plus volumineuse des deux remonte plus vite que l'autre. Quand son extrémité inférieure dépasse l'extrémité supérieure de la seconde pile, celle-ci est attirée : sa première bulle se colle à la dernière de l'autre pile. T. Maxworthy a observé une division qui commençait à la deuxième bulle : les bulles inférieures se sont divisées à leur tour, et les deux piles sont restées accolées par la bulle de tête, qui ne s'était pas divisée.

J'ai cherché à observer une division de pile dans différents liquides. J'ai échoué avec de la glycérine, différents sirops et plusieurs shampooings : les bulles s'accrochaient les unes aux autres, mais quelques secondes plus tard, les minces parois se déchiraient et les bulles se fondaient les unes dans les autres.

J'ai eu plus de chance avec d'autres liquides visqueux, et notamment des shampooings gel ou des gels pour la douche contenant du propylène glycol, de la glycérine, du collagène soluble et divers additifs. La série de photographies de la figure 2 représente l'évolution d'une de ces piles : la bulle supérieure commence à se déformer, puis s'établit sur le côté gauche de la pile, tandis que l'instabilité se transmet à la bulle suivante qui se divise. La troisième se déforme et se sépare à son tour, et finalement deux bulles se détachent à droite et forment une petite pile. Puis le sommet de la partie gauche de la pile, la plus longue, commence à se diviser et, simultanément la grande pile attire la petite, qui s'accroche à la dernière bulle de la pile qui la précède.

Les grosses bulles isolées sont également instables et se divisent sans perturbation apparente ; parfois aussi, c'est une petite bulle, sur leur passage, qui déclenche la division. Généralement, lorsqu'une pile de bulles rencontre une petite bulle isolée, elle pousse la petite bulle sur le côté et continue de monter en glissant contre elle, ce qui la déforme ; la pression est parfois suffisante pour que le côté s'incurve et que les bulles commencent à se diviser.

Les piles évitent les petites bulles presque immobiles, mais elles sont



5. Quelques formes de bulles se propageant dans de la glycérine et dans du shampooing *(à droite)*.

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

attirées par les bulles plus volumineuses et plus rapides. J'ai vu, par exemple, des grandes piles s'écarter de leur trajectoire pour rattraper des bulles isolées, même quand les trajectoires étaient décalées. À chaque fois, la pile accélérait et prenait les bulles en chasse. Au cours de cette chasse, certaines bulles de la pile s'allongeaient et s'amincissaient, leurs côtés gauche et droit devenant rectilignes voire concaves.

Afin de visualiser le sillage des bulles, j'ai ouvert la cellule et déposé un colorant alimentaire sur toute la longueur du joint inférieur, puis j'ai refermé la cellule. Les bulles d'air qui avaient été simultanément introduites sont remontées en entraînant le colorant, qui marquait leur sillage : les bulles qui commençaient à monter dans la zone claire du liquide laissaient une trace claire dans la bande colorée, tandis que les bulles qui partaient de la bande colorée laissaient une trace colorée dans la partie claire *(voir la figure 3)*.

La longueur des queues colorées qu'entraînent les bulles est plusieurs fois supérieure au diamètre des bulles. Je pense que le colorant des sillages provient de minces couches de fluide qui bordent les faces planes des bulles. Considérons une coupe d'une bulle et de la cellule *(voir la figure 4, à gauche)*. L'air de la bulle est séparé de chacune des plaques de la cellule par deux couches de liquide, si minces que, durant l'ascension des bulles, le fluide descend difficilement entre les bulles et les plaques. Quand du liquide pénètre par le haut dans cet étroit interstice, il s'en échappe par le bas. Sur une coupe de bulle verticale et parallèle aux plaques, on voit que le fluide passe à gauche et à droite de la bulle ascendante, puis converge au-dessous de la bulle ; cette convergence augmente la pression du fluide qui forme les minces couches latérales.

Lorsqu'une bulle passe du liquide clair à une couche de colorant, les minces couches latérales se colorent progressivement, mais le liquide qui s'échappe sous la bulle reste clair pendant quelques instants. Le liquide clair repoussé sous la bulle se rassemble en une traînée claire qui suit le trajet de la bulle. Le phénomène inverse se produit lorsque la bulle émerge de la bande colorée : la trajectoire est alors matérialisée par une traînée de couleur.

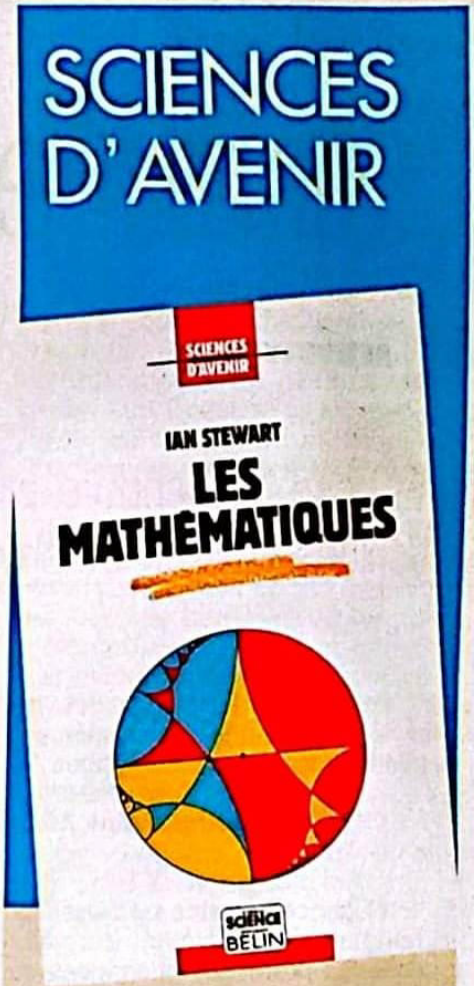
Plusieurs chercheurs ont remarqué que la forme des bulles d'air se déplaçant dans un liquide visqueux change selon les circonstances. Généralement l'équilibre entre les forces de tension superficielle, la poussée d'Archimède et les forces de pression confèrent aux bulles une forme circulaire ou elliptique, mais parfois les bulles ont des faces supérieures et inférieures aplaties. On observe souvent ces bulles aplaties ou en forme de poire quand la cellule est horizontale et que l'on pousse le liquide avec un piston.

L'an dernier, Anne Kopf-Sill et George Homsy, de l'Université Stanford, ont étudié ces formes et observé de nouvelles formes, encore plus étonnantes. Certaines bulles, par exemple, sont pourvues d'une queue, parfois courte et ronde, mais parfois également beaucoup plus longue même que le diamètre de la bulle, avec un petit renflement circulaire à leur extrémité. A. Kopf-Sill et G. Homsy ont également été les premiers à observer une forme prévue par la théorie, où la partie arrière est plate et la partie avant légèrement concave.

Dès qu'elles se mettent en mouvement, dans le sirop, l'huile et la glycérine, les grosses bulles acquièrent souvent de petites queues qui persistent, mais tremblent légèrement. Elles sont traversées à leur base par un trait plus pâle, qui semble fermer le contour ovale de la bulle.

J'ai surtout observé les bulles obtenues dans la glycérine ; lorsqu'une bulle en rejoint une autre, la paroi mince qui les sépare ne résiste que quelques secondes ; dans la zone qui a cédé, de petits dépôts incurvés de glycérine subsistent, contre les parois. À mesure que la grosse bulle nouvellement formée s'élève dans la cellule, ces dépôts de glycérine descendent et leurs extrémités déforment la bulle, lui donnant la forme d'une poire.

J'ai étudié le mouvement des bulles quand la cellule était verticale, mais j'ai parfois ralenti l'ascension des bulles en inclinant la cellule : j'ai posé la cellule près du bord d'une table recouverte d'une grande feuille de papier blanc et j'ai appuyé la partie supérieure sur des boîtes. J'ai orienté la lampe afin que la lumière diffuse sur le papier et traverse la cellule. Il faut placer la base de la cellule juste au bord de la table, de façon à pouvoir y injecter de l'air avec la seringue. Je vous laisse découvrir vous-même le comportement des bulles dans d'autres fluides visqueux, comme par exemple du miel, de la gélatine ou de l'huile de moteur. ■



LES MATHÉMATIQUES

Ian Stewart présente les domaines de pointe des mathématiques, la richesse et la dynamique de cette science.
Il retrace les avancées de sujets établis comme les géométries non-euclidiennes, la théorie des nombres premiers et la logique, il initie le novice aux théories plus récentes comme le chaos, les fractals, les catastrophes et les probabilités.
Il montre brillamment que les mathématiques, ce sont plus des idées que des calculs, plus une aventure de l'intelligence qu'une aride discipline scolaire.
Dans l'âge d'or des mathématiques que nous vivons, les incursions de Ian Stewart aux frontières de nos connaissances posent de vraies questions : les questions ouvertes.

POUR LA SCIENCE DIFFUSION BELIN

Bon de commande page 98 A

Esprit, es-tu là ?

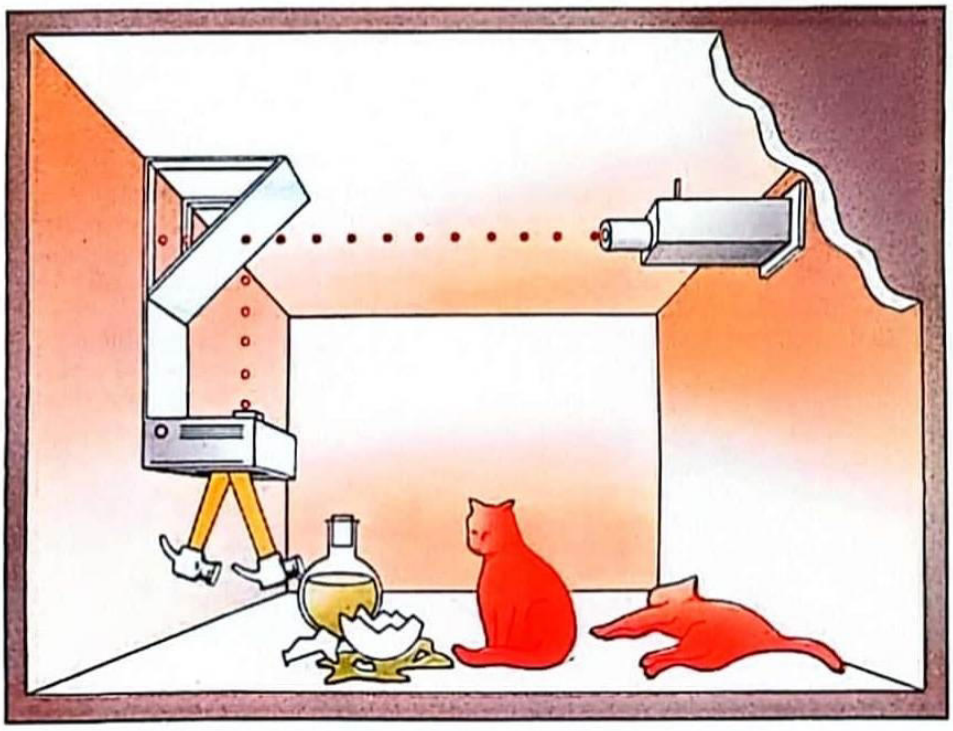
A. DEWDNEY

Une boîte de Pandore pleine d'esprits, de machines et de métaphysique.

« L'esprit est-il régi par les lois de la physique ? Savons-nous seulement ce que sont les lois de la physique ? »
Roger PENROSE
The Emperor's New Mind

L'intelligence humaine surpasse l'intelligence artificielle, car elle exploite les propriétés quantiques de la nature. Cette déclaration provocante est extraite du dernier livre de Roger Penrose, célèbre pour ses nombreuses innovations mathématiques et physiques : notamment les pavages découverts par R. Penrose dans les années 1960 expliquent la structure des quasi-cristaux découverts en 1985 et qui présentent une incroyable symétrie pentagonale. De l'avis même de R. Penrose, on ne sait pas encore prouver la déclaration provocante, mais les arguments exposés dans *The Emperor's New Mind* (Le nouvel esprit de l'empereur) sont troublants et contestent sainement les fondements philosophiques de l'intelligence artificielle.

Nous reviendrons plus loin sur les arguments de R. Penrose, mais nous profiterons de la grande liberté de cette rubrique pour examiner certaines de ses idées et tester quelques-unes de ses conclusions. Nous considérerons notamment sa question « Comment pensons-nous ? », afin de déterminer si les êtres humains pourront un jour répondre à cette question.



1. Le chat de Schrödinger est-il mort, vivant ou simultanément mort et vivant ?

Si l'Univers est infiniment complexe, on ne pourra peut-être jamais y répondre complètement ; en revanche, des possibilités de calcul extraordinaires sont peut-être possibles.

Explorons le monde étonnant de *The Emperor's New Mind* : nous visiterons d'abord la salle chinoise, afin de savoir si les programmes « intelligents » comprennent ce qu'ils font ; puis dans la caverne de Platon, nous rencontrerons un billard où les lois de la mécanique classique et, notamment, des chocs élastiques sont capables d'effectuer quasiment tous les calculs ; notre troisième étape sera le laboratoire d'Erwin Schrödinger, afin de prendre des nouvelles de son chat, et de mieux comprendre les relations entre la physique classique et la mécanique quantique ; enfin nous arriverons à destination : une intelligence infinie, capable de résoudre un problème hors de portée de tout ordinateur.

L'indignation de R. Penrose est née il y a plusieurs années, quand il vit une émission de télévision où des spécialistes de l'intelligence artificielle soutenaient que des ordinateurs, peu différents de ceux que nous connaissons, pourraient être un jour plus intelligents que des êtres humains. Quoi ? L'exécution d'un algorithme, dans les circuits d'un ordinateur, pourrait reproduire toutes les subtilités de l'intelligence humaine ? La créativité, notamment, serait mécanique ? Ce jour-là, R. Penrose décida d'écrire son livre.

En étudiant méthodiquement la théorie du calcul, R. Penrose en vint à critiquer l'une de ses bases philosophiques : le test de Turing. De nombreux informaticiens admettent que ce test pourrait distinguer les programmes intelligents de ceux qui ne le sont pas. Lors du test, un examinateur humain transmet des messages (tapés sur un clavier), à deux interlocuteurs invisibles : l'un est humain et l'autre est un ordinateur programmé pour répondre intelligemment. Si l'examinateur ne parvient pas à distinguer l'Homme de la machine, on considère que le programme est intelligent.

Selon R. Penrose, ce test ne démontre pas directement l'intelligence des programmes. Celle-ci n'est peut-être qu'un simulacre : même un objet et son reflet dans un miroir ont le même aspect, mais ils sont de nature différente. Pour tester directement l'intelligence, il faudrait un test plus élaboré que celui de Turing.

Ces arguments sont renforcés par une visite à la salle chinoise, inventée par le philosophe John Searle. Cette salle est une variante du test de

Turing : l'examinateur est à l'extérieur de la pièce, et la communication ne s'effectue qu'à l'aide de petits papiers. L'examinateur écrit une histoire, puis transmet des questions concernant cette histoire, à l'intérieur de la pièce. Point essentiel : tous les messages entrant ou sortant sont écrits en caractères chinois.

Dans la pièce, une personne exécute le programme qui doit répondre aux questions posées. Cette personne remplace ainsi l'ordinateur ; elle a une tâche fastidieuse, mais pas difficile : elle n'exécute que les instructions du programme. Pour éviter que l'homme-machine ne prenne des décisions indues, il ne doit pas connaître le chinois. Que doit-on conclure si la salle chinoise semble comprendre l'histoire et répondre intelligemment aux questions ?

Selon R. Penrose, le succès de l'algorithme ne prouve pas qu'il y ait eu une quelconque compréhension ; en outre, la conclusion semble valable quelle que soit l'entité qui a exécuté l'algorithme ; que le programme soit exécuté par un être humain ou par une machine, le résultat du programme est le même pour l'examinateur.

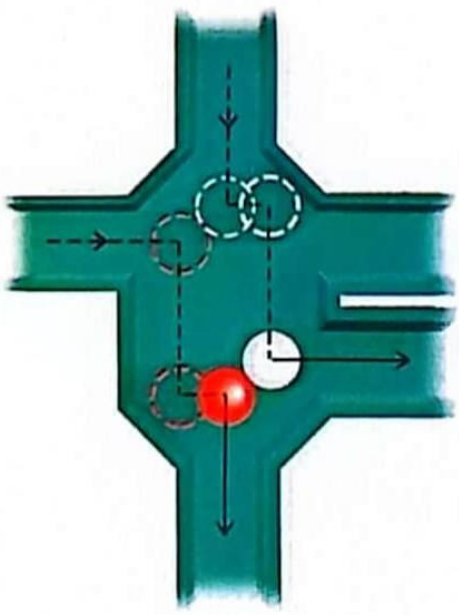
Pour cette raison, on peut négliger l'individu qui est à l'intérieur de la salle : on ne critique pas un programme sous prétexte que l'unité de traitement ne comprend pas ce que le programme lui fait faire. De même, personne ne reproche à un neurone de ne pas comprendre le sens des influx nerveux qu'il transmet, que ceux-ci correspondent à une simple étape de l'algorithme ou à une tâche beaucoup plus complexe. L'intelligence artificielle ne peut se trouver que dans les algorithmes. C'est ce que R. Penrose conteste ensuite.

Le monde des algorithmes est essentiellement celui du calculable : « Les algorithmes ne sont qu'une toute petite partie des mathématiques. » Comme beaucoup de mathématiciens et comme moi-même, R. Penrose pense que les objets mathématiques ont une sorte de réalité platonicienne. Nous croyons que de tels objets existent indépendamment de nous, car nous ne pouvons pas les modifier ; ils sont « là », comme les montagnes ou les océans.

À titre d'exemple, R. Penrose cite l'ensemble qui a été popularisé par le mathématicien français Benoît Mandelbrot, du Centre de recherches d'IBM à Yorktown Heights et qui, aujourd'hui, porte son nom. B. Mandelbrot n'a pas « inventé » cet ensemble : il l'a seulement découvert. Comme la planète Neptune, par exemple, cet ensemble existait aussi bien avant qu'on l'observe. N'imaginez pas que l'ensemble de Mandelbrot soit un produit des mathématiques ou de l'informatique : on ne peut même pas le calculer !

L'ensemble de Mandelbrot est un bon exemple d'objet platonicien, mais il échappe aux algorithmes. En effet, nous avons déjà vu dans cette rubrique que l'on obtient les points de l'ensemble de Mandelbrot par un processus itératif : on élève au carré un nombre complexe c ; puis on élève le résultat z_1 au carré et l'on ajoute c : on obtient z_2 ; on répète les opérations avec z_2, etc. Si la suite des valeurs de c, z_1, z_2, ... est bornée, c'est-à-dire si cette suite ne croît pas indéfiniment, alors le nombre c appartient à l'ensemble de Mandelbrot. Combien de fois doit-on effectuer l'itération afin de savoir que la suite des nombres z reste bornée ? Une infinité.

Dans la pratique, on met arbitrairement un terme au calcul, mais on attribue inévitablement à l'ensemble des points qui n'en font pas partie, car les suites issues de ces points mettent trop de temps à diverger. Ces difficultés pour construire l'ensemble de Mandelbrot sont peu de choses par rapport à d'autres limitations des processus algorithmiques. D'un point de vue théorique, on considère par exemple que les mathématiques sont fondées sur des axiomes ; ceux-ci étant choisis, tous les résultats mathématiques découleraient automatiquement de l'application de quelques règles de déduction. Un algorithme conceptuel, appelé algorithme du British Museum, est censé trouver tous les théorèmes qui seraient démontrables à partir des axiomes et des règles d'inférence ; malheureusement certains théorèmes échappent à l'algorithme.



2. Une porte logique ET... au billard.

Cette découverte, due au mathématicien Kurt Gödel, ruina les espoirs de ceux qui espéraient mécaniser les mathématiques. Selon R. Penrose, le théorème de Gödel prouve que l'intelligence humaine transcende la méthode algorithmique : « Grâce au résultat de Gödel, on sait que l'on ne peut décrire toutes les vérités mathématiques par une structure formelle. » Le théorème de Gödel pourrait-il, lui-même, être le résultat d'un algorithme ?

Cette question a déjà été évoquée, mais je n'en connais pas la réponse. Il me semble que le théorème de Gödel peut être démontré à partir d'axiomes et de règles d'inférence, et qu'il peut être le premier maillon d'une chaîne infinie de métathéorèmes. Si vous avez étudié cette question, je vous serais reconnaissant de me faire part de votre point de vue.

Quel que soit le statut du théorème de Gödel, R. Penrose attaque encore les prétentions de l'intelligence artificielle sur un autre front : la physique des calculs. Il soutient que les calculs relèvent plus du domaine tangible de la physique classique que du domaine plus obscur de la physique quantique : les ordinateurs sont des systèmes déterministes, qui ne font qu'exécuter des algorithmes. L'attaque est menée à l'aide d'un billard, comme modèle d'ordinateur.

Un billard aux bords redessinés fonctionne comme un ordinateur ; les boules transmettent les informations, et leurs collisions peuvent reproduire les opérations logiques ; ce principe a été imaginé il y a quelques années par deux informaticiens de l'Institut de technologie du Massachussets : Edward Fredkin et Tommaso Toffoli.

La figure 2 représente ainsi une porte logique : les boules entrent dans la chambre centrale par deux voies d'accès et peuvent ressortir par trois autres voies. Quand une seule boule entre dans la chambre, elle ressort soit par la voie inférieure, soit par la voie supérieure, à droite. Quand deux boules pénètrent simultanément dans la chambre, l'une d'elles sort en bas et l'autre en bas, à droite. Le passage d'une boule dans cette voie inférieure de droite correspond à une fonction

logique ET : une boule est présente dans cette voie, si et seulement si une boule entre dans la chambre par une voie d'entrée *et* une boule entre par l'autre voie.

On pourrait construire un ordinateur en assemblant plusieurs exemplaires de cette porte logique et d'un autre type de porte : une chambre où une boule sortirait par une voie, si et seulement si une autre boule n'entre pas par une autre voie. Je vous laisse imaginer la configuration de cette porte logique, en précisant qu'une troisième boule peut être utile. Les mouvements des boules de billard ont les beautés de la régularité... et de la simplicité : une boule de billard n'est jamais, simultanément, en deux endroits différents. En mécanique quantique, au contraire, ce genre de situations paradoxales est courant (voir *La réalité du monde quantique*, par Abner Shimony, *Pour la Science*, n° 125, mars 1988).

Lorsque des photons traversent un écran percé de deux fentes, ils se comportent comme des ondes, qui interagissent entre elles : des franges d'interférence apparaissent sur un écran placé derrière les fentes. Si l'on place un détecteur derrière chaque fente, on oblige les photons à « décider » dans quelle fente ils passent ! On peut réaliser cette expérience à plus grande échelle, en écartant les fentes d'un kilomètre ou d'une année de lumière, peu importe. Certains physiciens pensent que ce photon ne peut choisir dans quelle fente il passe que s'il est initialement présent aux deux endroits simultanément.

À partir de quelle échelle un système quantique devient-il « classique » ? Ce dilemme est illustré par l'expérience conceptuelle du chat de Schrödinger : un physicien qui ne redoute pas la Société protectrice des animaux enferme dans une pièce un chat, une ampoule contenant du gaz toxique, un laser, un photodétecteur, un miroir semi-transparent et un marteau *(voir la figure 1)*. Une fois la pièce fermée, le laser envoie un photon vers le miroir. Si le photon traverse le miroir, rien ne se passe ; si le photon est réfléchi vers le photodétecteur, celui-ci actionne le marteau, qui casse l'ampoule : le gaz se répand et tue le chat.

Un observateur qui reste à l'extérieur de la pièce ignore si le chat est mort ou vivant. Dans le monde quantique, les deux états coexistent, comme si deux mondes étaient parallèles, mais dans celui de la mécanique classique, un seul des deux états existe. R. Penrose remarque qu'aucune théorie actuelle ne traite le domaine intermédiaire entre la physique classique et la physique quantique ; les deux théories sont distinctes et il existe sans doute un moyen de les unifier. La synthèse proviendra-t-elle de la théorie de la gravitation quantique ?

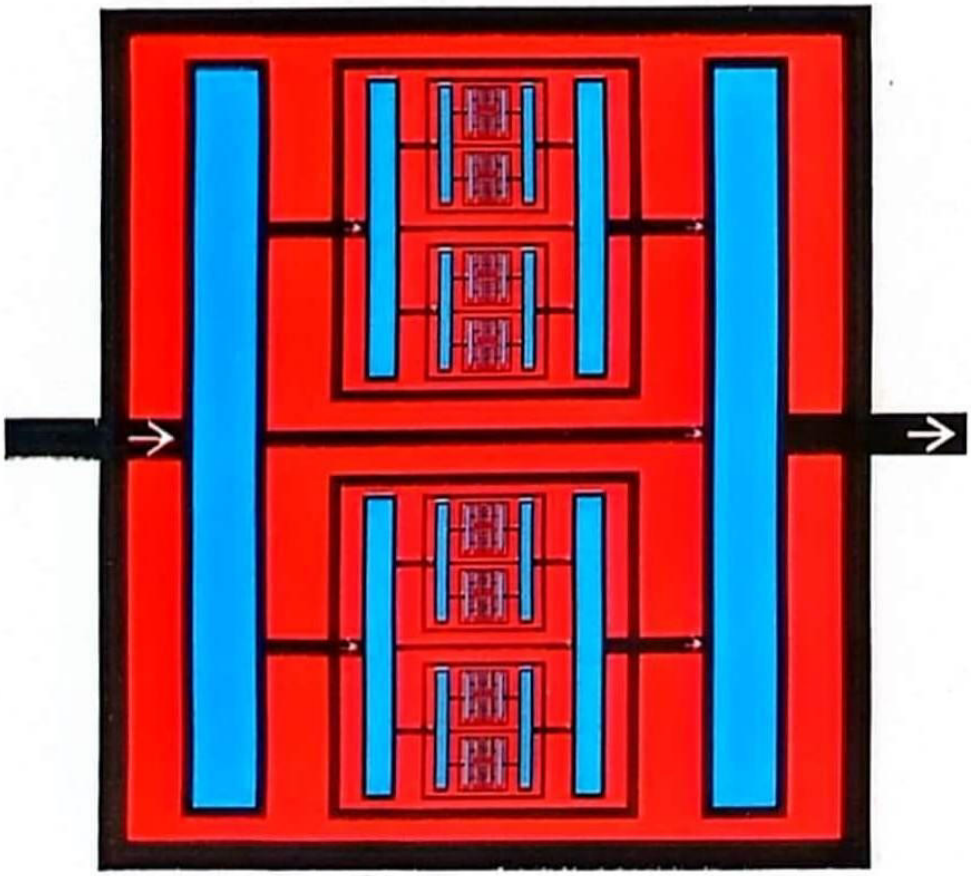
Revenons à l'esprit humain. R. Penrose pense que la conscience n'est pas purement algorithmique. À l'échelle quantique, plusieurs états peuvent coexister ; un état quantique simple pourrait simultanément décrire un très grand nombre d'activités différentes. L'esprit humain tire-t-il parti de ce phénomène ? Je n'ai pas la verve que R. Penrose déploie pour présenter cette hypothèse extraordinaire et je renvoie les lecteurs intéressés à son livre.

Une idée analogue m'intrigue : les êtres humains pourraient-ils quantifier leur intelligence dans un univers infiniment complexe ? Je conçois difficilement l'existence d'une limite aux structures de la matière.

La physique me semble une aventure sans fin : lorsque l'on découvre une structure « ultime », on recherche aussitôt pourquoi cette structure est ultime. De toutes façons, je préfère penser que j'appartiens à un univers infini ; notre esprit semble avoir ainsi beaucoup plus de possibilités.

Par leur construction, les ordinateurs ne subissent pas les phénomènes physiques qui ont lieu à des échelles inférieures à une limite donnée. On doit protéger l'algorithme des « erreurs parasites ». Nous ignorons si le cerveau humain est construit ainsi, remarque R. Penrose ; des phénomènes à l'échelle atomique jouent peut-être un rôle dans le mécanisme de la pensée. On connaît en tout cas le rôle des phénomènes à l'échelle moléculaire : les neuromédiateurs, notamment, transmettent les informations entre les neurones. En outre, on sait combien la nature tire parti, dans les organismes, de toutes les possibilités physiques. Si les structures physiques s'étendent suffisamment, peut-on croire *a priori* que le cerveau ne puisse les exploiter ?

Qu'adviendrait-il si le cerveau pouvait utiliser une infinité de niveaux de structures ? Pour montrer la puissance d'un tel cerveau, j'ai imaginé un ordinateur « infini » qui tirerait part de la structure à toutes les échelles. Pour les besoins de la démonstration, supposons que chaque niveau est de structure classique.



3. L'ordinateur fractal résoud le problème de Thue.

Mon ordinateur infini est un carré qui contient deux rectangles et deux petits carrés *(voir la figure 3)*. Sur le bord gauche du grand carré, un circuit pénètre jusqu'au premier rectangle, qui est un organe de traitement que j'appelle module de substitution. Celui-ci est relié aux deux petits carrés et à l'autre rectangle, que j'appelle module de message.

Cette structure se reproduit à l'infini : chaque petit carré est l'image réduite du grand carré. Un signal transite dans un petit carré deux fois plus vite que dans un grand, et chaque module fonctionne deux fois plus vite que le module d'ordre supérieur.

Cet ordinateur résoud le problème imaginé par le mathématicien Axel Thue, qui consiste à passer d'un mot à un autre, à l'aide d'une suite de substitutions. Le passage est-il toujours possible ? Supposons que le mot de départ soit 100101110, et le mot final 01011101110. Peut-on passer du premier mot au second, en n'utilisant que les substitutions suivantes : 010 peut se transformer en 110, 10 en 111, 100 en 001 ? J'ai choisi cet exemple au hasard et n'ai volontairement pas tenté de le résoudre.

Dans certains cas, aucune suite de transformations ne peut résoudre le problème, mais il existe naturellement des cas où la substitution est possible... parfois après un très grand nombre d'étapes et des passages par des mots intermédiaires très longs. Comme avec certains points de l'ensemble de Mandelbrot, on n'obtient pas la réponse, en pratique. Il n'existe donc pas d'algorithme de résolution, car, par définition, un algorithme doit s'achever. Le problème de Thue est « indécidable » ; aucun programme informatique, même en principe, ne peut le résoudre totalement.

Examinons maintenant comment l'ordinateur infini traiterait ce problème. On chargerait le mot final dans le premier module de substitution, en un quart de seconde. Le mot serait ensuite transmis aux deux modules du niveau inférieur, en un huitième de seconde, puis aux modules suivants en un seizième de seconde, etc. En une demi-seconde, tous les modules contiendraient le mot en mémoire.

On introduirait ensuite les règles de substitution par le même procédé et à la même vitesse. Cette fois, cependant, les modules de substitution seraient préprogrammés : chacun d'entre eux n'accepterait qu'une formule de substitution, et ne tenterait cette substitution qu'à un emplacement particulier dans le mot. La répartition de ces substitution serait certainement très ennuyeuse à exposer, mais ceux d'entre vous qui apprécient les voyages dans l'infini pourront essayer de l'imaginer.

Le calcul commencerait avec l'introduction du mot initial. Le premier module tenterait la substitution dont il est chargé, à l'endroit indiqué ; en cas d'échec, il transmettrait le mot inchangé au carré inférieur de l'ordre suivant ; en cas de succès, il transmettrait le mot modifié au carré supérieur de l'ordre suivant. Un mot modifié identique au mot final serait signalé au module de message : « succès ».

À chaque niveau, chaque carré fonctionnerait de la même façon. Comme je l'ai indiqué, on peut répartir les substitutions dans l'ordinateur infini (et l'emplacement des substitutions) de sorte que le problème du mot soit toujours résolu. La résolution prendrait une seconde : une demi-seconde pour parcourir l'infinité de modules de substitution et une demi-seconde au maximum pour communiquer les messages « succès » ou « échec ». Réfléchissez à cet ordinateur infini : vous pourrez exercer les nombreuses (et peut-être infinies) structures de votre cerveau.

Dans la rubrique d'octobre 1989, j'avais posé un problème extrait du livre de Denis Shasha *The Puzzling Adventures of Dr Ecco* : on recherchait le plan d'un laboratoire de recherche, en Antarctique, avec 31 pièces ne pouvant avoir plus de quatre portes chacune ; on devait pouvoir passer d'une pièce à une autre sans jamais franchir plus de six portes.

J'avais proposé de résoudre le problème pour plus de 31 pièces et plus de 100 lecteurs ont envoyé des solutions à D. Shasha ! Beaucoup d'entre eux ont réussi à placer 53 pièces sur un plan en forme d'arbre. Des lecteurs ingénieux ont compris qu'il n'était pas nécessaire de traverser la même pièce centrale. En juxtaposant les parties communes à deux arbres, ces lecteurs ont obtenu une architecture à 70 pièces sur le même niveau. Eric Jordan et Eric Weeks, de Downers Grove, ont trouvé une solution encore plus ingénieuse en partageant en deux certaines pièces. ■

FONDATION FYSSEN

194, rue de Rivoli – 75001 Paris – Tél. (1) 42.97.53.16

La Fondation Fyssen a pour objectif général « de promouvoir sous toutes ses formes l'analyse scientifique des mécanismes logiques du comportement animal et humain ainsi que leur développement ontogénétique et phylogénétique ». Pour ce faire, la Fondation soutient la recherche dans des domaines qui correspondent à ses objectifs tels que l'éthologie, la paléontologie, l'archéologie, l'anthropologie, la psychologie, l'épistémologie, la logique et les sciences du système nerveux.

Bourses d'Etudes

La Fondation Fyssen attribuera un certain nombre de Bourses d'études. Ces bourses doivent permettre la formation et le soutien de chercheurs travaillant dans des domaines de recherche qui répondent aux objectifs de la Fondation. Elles sont réservées à des chercheurs français désirant se rendre dans des laboratoires étrangers et à des chercheurs étrangers venant travailler dans des laboratoires français.
Les demandes de bourses doivent être établies suivant un formulaire à demander à la Fondation.
Date limite impérative de réception des dossiers : 31 mars 1990

Prix international

Un prix international de 150 000 F sera attribué à un chercheur qui se sera distingué par une activité de recherche fondamentale qui correspond, directement ou indirectement, à l'objectif de la Fondation. Il a été décerné à MM. les Professeurs A. Leroi-Gourhan (1980), W.H. Thorpe (1981), V.B. Mountcastle (1982), H.C. Conklin (1983), R.W. Brown (1984), P. Buser (1985), D. Pilbeam (1986), D. Premack (1987), J.C. GARDIN (1988) et Mme le Professeur P. GOLDMAN-RAKIC (1989).

Discipline considérée pour le Prix 1990
Anthropologie et Cognition

Date limite de réception des propositions de candidature : 1er septembre 1990
On ne peut se porter directement candidat

Publications

Fondation Fyssen organise des colloques internationaux dont les actes sont publiés en langue anglaise chez Oxford University Press :
- Social relationships and cognitive development (R.A. Hinde – A.N. Perret-Clermont)
- Models of visual perception (M. Imbert)
- Thought without language (L. Weiskrantz – M. Jeannerod)

et en langue française aux Editions Delval :
- Relations sociales et développement des savoirs (R.A. Hinde – A.N. Perret-Clermont)

La fondation publie régulièrement « les Annales Fyssen » comportant notamment des articles originaux dans les différentes disciplines qu'elle soutient.
Toutes demandes de renseignements doivent être adressées à Fondation Fyssen.

Informatique

***La physique du calcul, histoire de l'ordinateur*, Jérôme Rammuni. Éditions Hachette, 1989.**

Les ordinateurs, introduits à l'occasion des calculs des physiciens, ont permis de faire davantage en offrant la possibilité de modéliser un processus physique par substitution du calcul à l'expérience. « Il n'y a aucune différence entre une expérimentation en soufflerie et la résolution des équations hydrodynamiques pour les problèmes d'ailes d'avion. » Cet exemple figure déjà dans J. Arsac, *Les machines à penser*.

L'ouvrage de J. Rammuni, en majeure partie consacré à l'histoire de l'ordinateur, rassemble un vaste corpus de faits, réels ou supposés, renforcés souvent d'une pointe de sensationnel, même au prix de l'inexactitude ou du manque de pertinence. Donald Knuth est une autorité internationale en informatique théorique ; lorsque l'auteur le présente comme « un programmeur de très haut niveau », certains trouveront qu'il se moque du monde ou qu'il se fourvoie dans le ridicule. Le chapitre sur John von Neumann et Alan Turing est presque en entier de la même veine. Le premier, « confiant en l'avenir des ordinateurs, ... pensait qu'il n'existe pas de logique des automates » ; finalement sa contribution est décrite en termes vagues. Son rôle, « de tout premier plan », se résume ainsi : « Il a saisi l'importance de la nouvelle machine pour son travail de mathématicien, et, analysant de ce point de vue les performances et les faiblesses de ce nouvel instrument, il a posé les jalons du développement de ce domaine. » Des manuels qu'on n'a aucune raison de contester, par exemple celui de R. Moreau (*Ainsi naquit l'informatique*, Éditions Dunod, 1982) retracent l'historique de l'erreur qui fit attribuer à von Neumann la paternité de l'idée de programme enregistré. En ce qui concerne Turing, R. Moreau ne mentionne même pas son nom, et J. Rammuni ne semble pas en mesure de dégager nettement l'impact pratique des travaux théoriques du savant, relatifs à la calculabilité effective. Un lecteur qui ne disposerait que de *La physique du calcul* ne pourrait pas savoir s'il existe une différence entre les automates abstraits de Turing et les ordinateurs réels, ni en quoi, le cas échéant, elle consiste. Et comment un rapport sur la construction d'une machine électronique, resté, à ce qu'indique l'auteur, ignoré jusque vers 1970, a-t-il pu exercer une influence ? S'agit-il donc d'un chapitre parasite, destiné à abriter artificiellement sous le patronage d'hommes illustres d'une entreprise où ceux-ci n'ont été pour rien ?

J. Rammuni cautionne la reconstitution historique après coup : de ce que, rétrospectivement, ce qu'on sait des idées de Turing et de von Neumann paraît rendre vraisemblable que ces idées devraient avoir eu un impact sur la conception des ordinateurs, on conclut erronément qu'elles ont effectivement eu cet impact. À force de rencontrer cette lecture imaginaire des événements chaque fois qu'il est question de ces sujets, les lecteurs non prévenus finiront par la confondre avec la vérité des faits. Il faudrait y opposer deux thèses : d'une part, que les ordinateurs n'ont jamais été conçus comme des machines de Turing ; d'autre part, qu'on aurait lieu de regretter qu'il en ait été précisément ainsi ! Car si les ingénieurs avaient été davantage versés dans la théorie des fonctions récursives ou dans les logiques combinatoires (lambda-calcul de Alonzo Church), certains organes des ordinateurs auraient une structure plus économique ou plus élégante.

Les insuffisances dues au caractère superficiel et rapide de l'exposé sont plus graves dans la partie qui concerne l'histoire intellectuelle des ordinateurs, les problèmes de conception, de finalité et de limitation. En particulier, l'ordinateur peut être considéré comme soumis à des contraintes physiques. Von Neumann soutenait que les processus de mesure sont irréversibles en ce qu'ils augmentent l'entropie (sauf si la grandeur à mesurer a une valeur unique). Pareillement les ordinateurs auraient une limitation thermodynamique, qui tiendrait à l'impossibilité d'accroître la vitesse de calcul sans faire croître la production de chaleur, laquelle entraîne erreurs ou défaillances. Malheureusement sur ces questions difficiles (chapitre VIII), l'exposé n'est ni sûr ni clair, à force d'être rapide et allusif. Personne n'a jamais pu rien tirer des remarques de von Neumann sur les causes thermodynamiques des erreurs de calcul des machines, et l'analogie entre la physique et le calcul, que J. Rammuni abrite derrière l'autorité de professeurs de l'Université de Rome, est probablement une impasse. Mainte autre affirmation se révèle être un non-sens. Que veut dire « La compréhension d'un processus de calcul revient à l'analyse de certains processus physiques » ? La phrase : « La physique est essentiellement l'expression de la calculabilité du substrat spatio-temporel » a un air de profondeur. Cela implique-t-il que les équations qui décrivent des processus ou des évolutions sont calculables (récursives) ? Elles ne le sont pas. « La théorie de l'information traditionnelle doit donc être scindée en deux chapitres : la transmission de l'information et le traitement de l'information » : ces deux choses n'ont rien à voir, car le traitement de l'information n'utilise pas le concept d'information de la théorie du signal (celui de C. E. Shannon). Bref le livre de J. Rammuni n'appartient ni à l'histoire ni à la philosophie des sciences. La représentation qu'il donne des sujets dont il traite pourrait être comparée à une carte géographique tracée d'après les dépliants d'agences de voyages. Elle n'est guère utilisable. C'est une marchandise fabriquée à partir d'informations de seconde main, et qu'un juge malveillant croirait assemblées dans un dessein racoleur et publicitaire.

(J'ai bénéficié de remarques de M. P. Schützenberger. Bien entendu, il n'est pas responsable de l'emploi que j'en ai fait.)

Jean LARGEAULT

Botanique

***Comment choisir et cultiver vos plantes carnivores*, Marcel Lecoufle. Éditions Bordas, 1989.**

On peut hésiter à présenter dans une revue scientifique un livre sous un tel titre, qui semble annoncer un guide pour jardiniers amateurs : on imagine un ouvrage destiné aux acquéreurs imprudents d'une dionée dont l'état de santé ne lui permet pas de réaliser les exploits carnassiers promis par la publicité. En fait, le choix de ce titre (volontairement modeste ?) est regrettable . ce livre magnifiquement illustré n'est pas seulement un manuel de culture de plantes insolites ; c'est un véritable ouvrage de botanique, où abondent les informations d'écologie et de phytogéo-

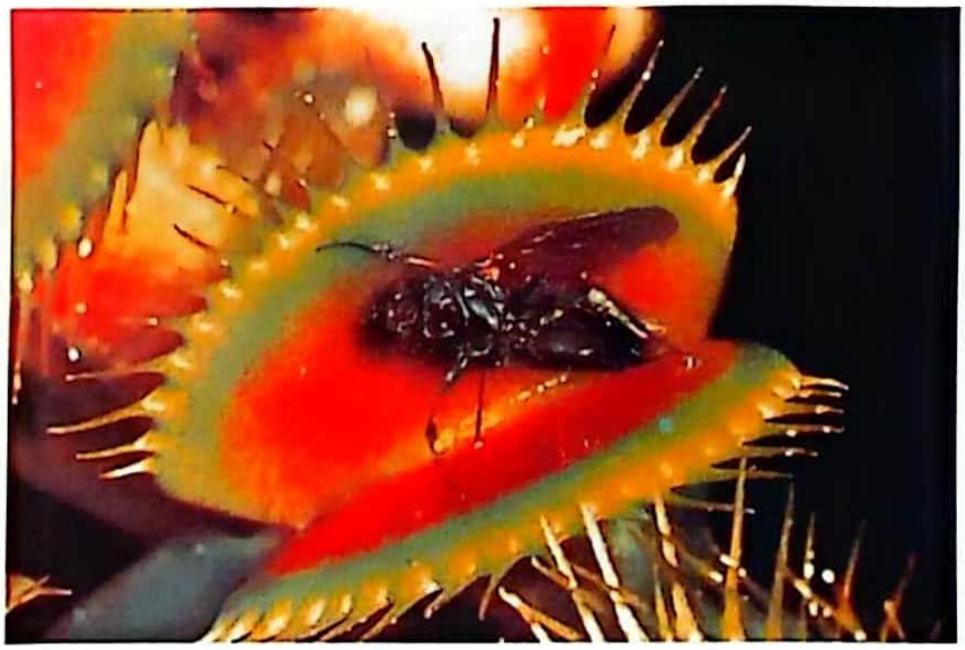
© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

graphie sur des végétaux qui, depuis Darwin et sans doute avant lui, ont suscité tant d'études et de controverses.

Un ouvrage sur le même sujet de Pierre Jolivet (voir *Pour la Science*, n° 128) a montré que certaines plantes à l'abri de tout soupçon se livraient à la carnivorie. Le livre de M. Lecoufle se limite aux genres et espèces « classiques », déjà suffisamment nombreuses : aux 530 espèces de Dicotylédones carnivores, il faudrait ajouter 140 espèces de Champignons prédateurs. Les premières appartiennent à des groupes très divers : sept familles, avec une quinzaine de genres, disséminées dans l'arbre généalogique des plantes à fleurs. Dans sa préface, Jean-Marie Pelt nous rappelle cette diversité, notamment celle des divers types de pièges végétaux. Il montre aussi que, si la carnivorie végétale est bien démontrée, l'origine d'un tel mode d'alimentation reste une énigme ; il souligne enfin que ces plantes, dont certaines ont payé un lourd tribut à l'industrie pharmaceutique, doivent être protégées.

Au sein des pages présentant les familles et genres de plantes carnivores, des cartes mondiales illustrent la répartition des divers types (taxons). Malgré quelques lacunes d'importances mineure, elles soulignent la progressive raréfaction de la plupart des genres et espèces du Sud au Nord, évoquant pour ces plantes une possible origine « gondwanienne ». On retiendra la particulière richesse de la flore australienne (deux familles endémiques, dont l'une, monospécifique, est localisée aux environs d'Albany, 54 espèces de *Drosera* sur un total de 100...). Les plantes à urnes (pièges passifs) ont une répartition plus restreinte, les unes américaine, les autres *(Nepenthes)* de Madagascar à la Papouasie (30 espèces, dont 21 endémiques, à Bornéo).

La description des pièges et de leur fonctionnement est suivie (conformément au titre du livre) de pages techniques sur la culture de ces plantes, naturellement frugales : leurs exigences écologiques, tant édaphiques que climatiques, sont généralement très strictes. À propos de la lutte contre les parasites, l'auteur propose parfois l'utilisation des substances hautement toxiques : amateurs s'abstenir ! En revanche, ces derniers pourront être tentés de réaliser une tourbière artificielle selon les directives proposées (mais l'eau de nos villes convient-elle ? Ce n'est pas précisé).



Un insecte digéré dans le piège de *Dionaea muscipula*.

Une exceptionnelle série de photographies (« pièges et fleurs ») précède la revue des principales espèces de plantes carnivores susceptibles d'être cultivées. Trente cinq monographies illustrées présentent, sous un plan uniforme, la description précise de la plante, sa biologie (nutrition, avec un tableau des proies capturées ; divers modes de reproduction...), mais aussi l'étymologie du nom, l'historique de l'étude ou de la découverte de l'espèce, sa place systématique, ses noms vernaculaires, sa répartition géographique, les caractères écologiques de son milieu naturel justifiant les conditions de culture, les parasites et maladies, éventuellement les variétés et les espèces proches.

Parmi les nombreuses illustrations, signalons d'abord les dessins botaniques ou techniques : comment inciser les graines « dures » de *Drosophylum lusitanicum*, bouturer les *Nepenthes* et les *Sarracenia*, féconder les *Darlingtonia*... données intéressant aussi bien les amateurs que les scientifiques désireux d'étudier la biologie ou la physiologie de ces plantes. Le simple curieux retiendra la qualité exceptionnelle des clichés détaillant les formes insolites et les vives couleurs des pièges, l'étonnante diversité des *Drosera*, l'aspect singulier des *Byblis* échevelés ou la survie des Sarracénies pourpres sous la neige...

Il est rare qu'un livre technique soit en même temps un livre d'art. C'est incontestablement le cas ici, car, bien au-delà des botanistes et des amateurs de plantes singulières, l'ouvrage de M. Lecoufle est susceptible d'intéresser même ceux qui n'ont pas la moindre intention d'élever à domicile ou dans leur serre des plantes carnivores : on ne peut rester insensible à leur insolite beauté, et à l'énigme que pose leur origine.

Marcel BOURNÉRIAS

Espace

***Clairs de Terre*, sous la direction de Kevin Kelley. Éditions Bordas, 1989.**

Cet ouvrage de grand format est sous-titré : « Les plus belles photographies prises depuis l'espace ». Il n'y a sans doute pas tromperie sur la marchandise : les images sont vraiment superbes, et l'on aura sans doute un grand plaisir à conserver ce livre chez soi, ouvert sur un présentoir à une page comme celle qui montre la mer du Nord. La reproduction des couleurs est remarquable, la maquette de l'ouvrage met bien les photographies en valeur et le point de vue est, naturellement, unique.

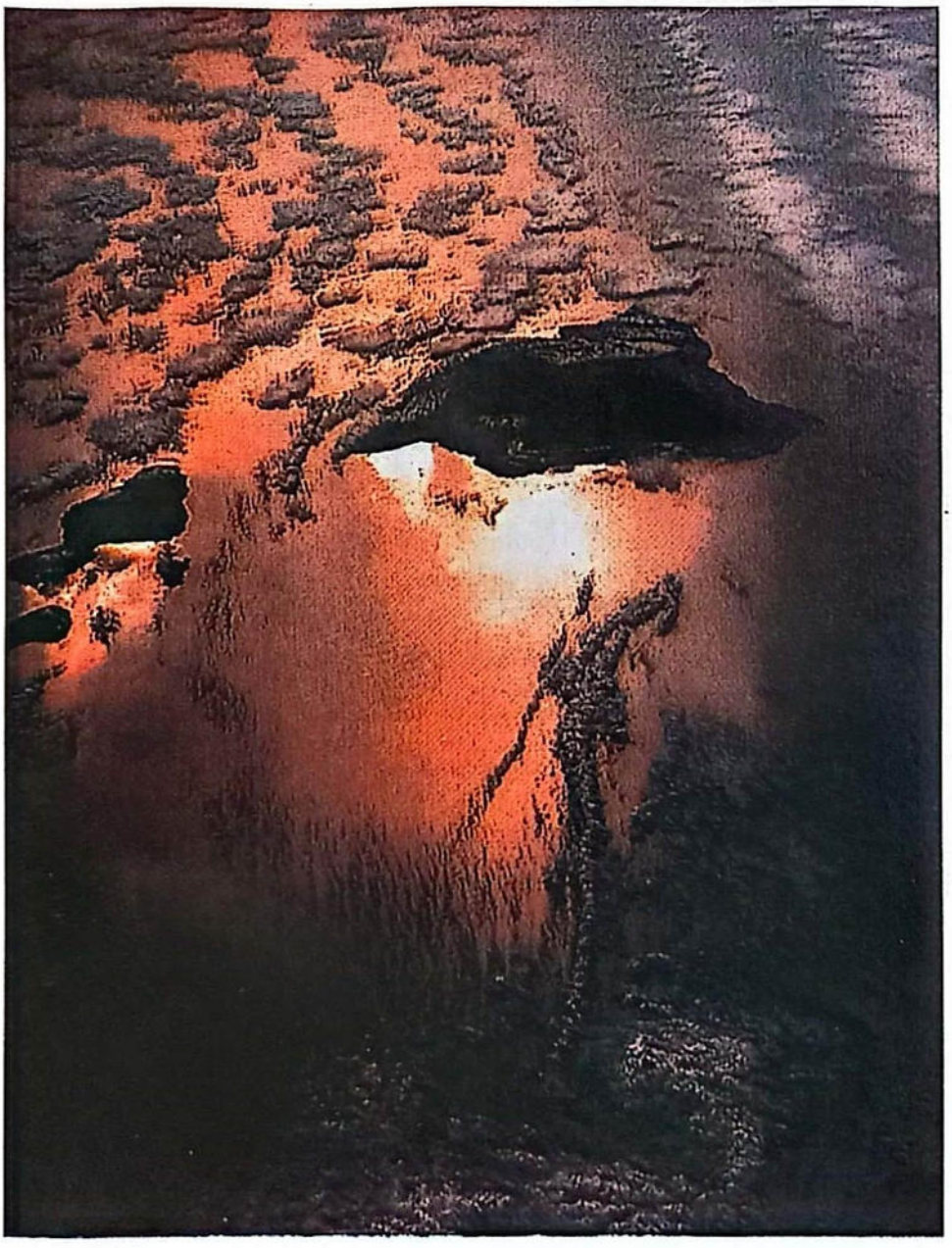
Toutefois bien des caractéristiques du livre irritent. D'une part, le livre commence par plusieurs préfaces, notamment dues à Patrick Baudry, Jean-

Loup Chrétien ou Jacques-Yves Cousteau, dont le message, certes poétique et parfois vibrant, reste souvent superficiel et naïf. Le texte d'Oleg Makarov, par exemple, commence ainsi : « Les cosmonautes sont des êtres taciturnes, surtout lors de leurs missions. Entre cinq et sept secondes leur suffisent pour exprimer les pensées les plus complexes... » Ne sont-ils particuliers que par cette caractéristique ? Auraient-ils l'apanage d'une pensée véloce ?

Plus loin dans l'ouvrage, les photographies sont accompagnées de courtes citations d'astronautes. L'éditeur a jugé intéressant de donner ces textes dans leur langue originale et en traduction. La photographie de la mer du Nord, par exemple, est accompagnée d'une citation de l'Allemand Sigmund Jahn : « Avant d'effectuer mon vol, je savais déjà que notre planète est menue et vulnérable. Mais c'est seulement lorsque je l'ai vue depuis l'espace dans son indicible beauté et sa fragilité que je me suis rendu compte que la tâche la plus urgente de l'humanité est de la garder et de la préserver pour les générations à venir. » Le message est édifiant, mais sa répétition, page après page, est lassante. En outre, certains textes tendent à une déification indue des cosmonautes, et l'enthousiasme que ceux-ci cherchent à communiquer est bien souvent desservi par des citations littérairement indigentes. À côté d'une photographie du plateau du Djado au Niger, Valentin Lebedev écrit : « Les premiers plants ont poussé dans notre jardin. Nous avions planté de la betterave, du radis et du concombre. Le pois sort du sol avec une tige épaisse et des feuilles étroitement enroulées. Le blé, lui, surgit du sol comme un rai de lumière verte. J'aime passer ma main sur les pousses. Cela chatouille. » Que voilà la preuve d'un grand esprit ! Que nous voilà avancés sur les tenants et les aboutissants des programmes spatiaux.

Un tel livre est beau, certes, mais est-il intellectuellement à la hauteur d'une humanité qui envoie des représentants dans l'espace ?

Hervé de BRIALMONT



Les îles Hawaii.

Paléontologie

Le monde perdu des dinosaures, Jean-Guy Michard. Éditions Gallimard, 1989.

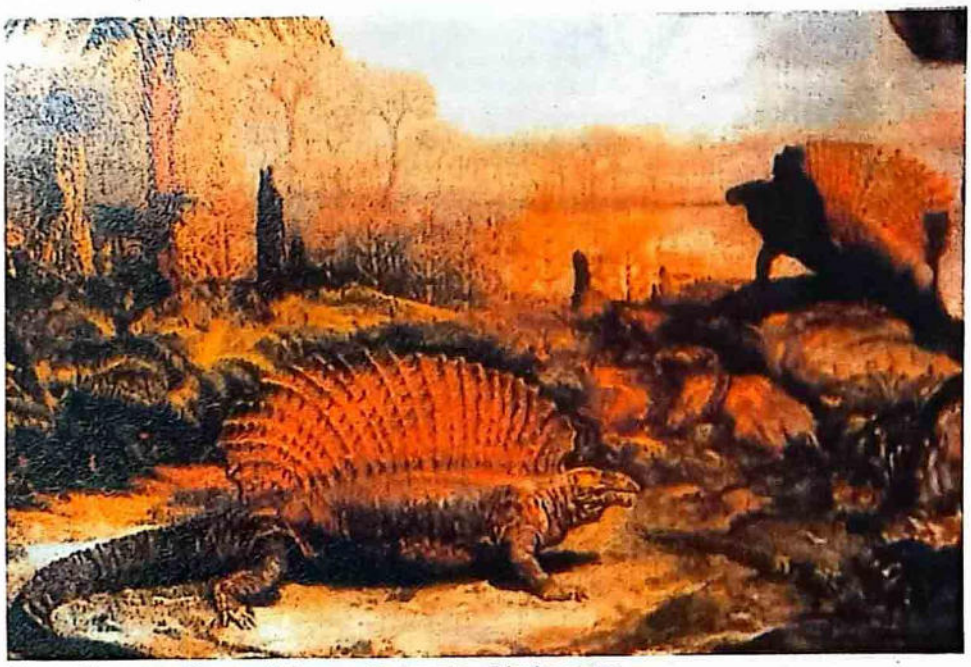
On connaît le principe de la collection « Découvertes Gallimard » : sur les sujets les plus variés, une illustration très abondante et bien mise en page accompagne un texte concis, complété par des « témoignages et documents ». Les dinosaures se prêtent naturellement bien à un tel traitement, qui fait appel avant tout à l'image. L'illustration est donc ce qui attire d'abord dans ce livre. Elle combine harmonieusement fossiles, photographies de fouilles, portraits de paléontologues célèbres et reconstitutions anciennes et modernes. On feuillette donc ce volume avec un plaisir visuel certain.

Toutefois ce mélange iconographique plaisant présente quelque danger : le lecteur non spécialiste risque de distinguer difficilement les reconstitutions scientifiquement satisfaisantes, produites ces dernières années, de celles, plus anciennes, qui le sont moins. Dans certains cas, la légende indique les conceptions erronées (à propos, par exemple, des brachiosaures complètement immergés de Burian), mais souvent rien ne permet au profane de juger de la rigueur scientifique d'une image par ailleurs esthétiquement réussie. Le sauropode de Neave Parker, à la page 70, est impressionnant, mais par trop obèse, et certainement moins proche de la réalité que celui de Mark Hallett, à la page 76, plus svelte et mécaniquement plus crédible. Quant aux céra-

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

topsiens des pages 80 et 81, leurs gueules largement fendues sont en contradiction avec les études récentes, montrant que ces animaux possédaient des joues.

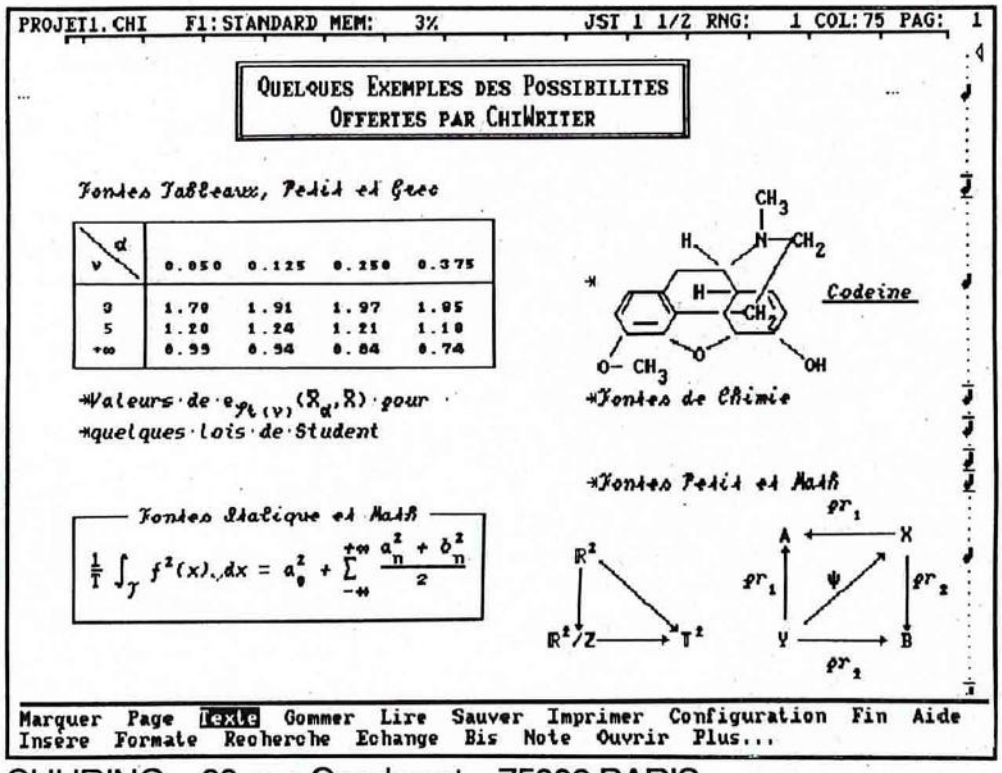
Le texte, lui, est clair et à la portée de tous... mais parsemé de petites erreurs ; la plupart relèvent probablement de la « faute d'inattention », mais celles-ci, à la longue, finissent par irriter. La première apparaît dès la première phrase du livre, qui annonce que les dinosaures sont « apparus il y a 150 millions d'années » ; en fait, les plus anciens d'entre eux remontent à quelque 220 millions d'années (ce que montre d'ailleurs clairement le tableau de la page 135). Les légendes des figures comportent également des fautes. On trouve ainsi, page 92, un cadavre d'ankylosaure, symbolisant le « dernier dinosaure », affublé du nom de stégosaure : c'est d'autant plus regrettable que les stégosaures se sont vraisemblablement éteints bien avant la disparition finale des dinosaures, à la fin du Crétacé ! La table des illustrations rétablit la vérité, mais une lecture plus soigneuse des épreuves eût sans doute évité ces défauts gênants dans un livre destiné aux non-spécialistes.



Un reptile mammalien muni d'une voile dorsale : *Edaphosaurus.*

Le texte de fond a bien des qualités. Il s'attaque avec raison aux clichés selon lesquels les dinosaures étaient, sans exception, de gros animaux stupides, incapables de s'adapter au moindre changement de leur milieu, et donc voués à l'extinction. Cependant, à côté d'allusions à des décou-

ChiWriter



CHURING – 20, rue Condorcet – 75009 PARIS

Le traitement de texte scientifique multifonte pour micro-ordinateurs IBM et compatibles

Pour moins de 1000 F H.T, simple, puissant, évolutif, c'est le traitement de texte des scientifiques.

Disquette de démonstration gratuite sur simple appel au **(1). 48.56.02.18**

☐ ChiWriter version de base 840,00 F H.T.

☐ ChiWriter version recommandée 1.040,00F H.T.

vertes ou interprétations récentes (au sujet, par exemple, des vocalisations possibles des « dinosaures à bec de canard »), le texte pourrait souvent avoir été écrit il y a 20 ans. On lit, par exemple, que « le terme dinosaure n'est plus guère utilisé par les spécialistes » ; en fait, ils sont de plus en plus nombreux à penser que les deux « sous-groupes » Saurischiens et Ornithischiens constituent un groupe monophylétique. On lit aussi que « de nombreux spécialistes » pensent que *Tyrannosaurus* était plus charognard que prédateur, alors que cette interprétation a été battue en brèche et ne trouve plus guère d'adhérents.

C'est surtout à propos du grand problème de l'extinction des dinosaures que se manifeste le plus clairement ce conservatisme excessif. Jean-Guy Michard n'apprécie guère la multiplication des hypothèses à ce propos, et il l'écrit clairement : il y voit une « extinction de l'esprit scientifique », alors que l'on doit plutôt se féliciter de la vigueur de la controverse qui porte depuis plusieurs années sur les extinctions de la fin du Crétacé. Le fait qu'un problème essentiellement paléontologique soit devenu une des grandes énigmes scientifiques modernes devrait être pour les paléontologues une source de satisfaction ; vouloir nier le problème ou se tenir à l'écart d'un débat que l'on juge à tort inutile est pour eux une attitude stérile, voire suicidaire.

J.-G. Michard croit résoudre le problème en faisant appel à la vieille théorie qui explique les extinctions de la fin du Crétacé par la régression marine de cette époque. Cependant, écrire que « cette hypothèse constitue le modèle scientifique le plus simple, donc le plus fiable *a priori* », c'est aller vite en besogne : des objections sérieuses, voire dévastatrices, ont été opposées à l'hypothèse en question. Quoi qu'il en soit, et quoi qu'en dise l'auteur, la disparition des dinosaures est un problème passionnant (et pas seulement pour les paléontologues !), qui mérite mieux qu'une conclusion rapide et superficielle.

Somme toute, ce livre aurait gagné à plus de hardiesse. L'étude des dinosaures a connu bien des bouleversements depuis quelques années et, même si certains « révolutionnaires » sont sans doute allés un peu loin, l'ouvrage de J.-G. Michard ne transmet qu'un écho bien atténué du tumulte actuel, signe de la santé de la science paléontologique.

Eric BUFFETAUT

Médecine

La migraine, Marie-Germaine Bousser et Hélène Massiou. Éditions Hermann, 1989.

Connue depuis l'Antiquité, la migraine touche de façon ubiquitaire un enfant sur 20, une femme sur 5, un homme sur 10. D'innombrables recherches lui ont déjà été consacrées, la médecine a accumulé quantité de connaissances à son sujet, mais on ignore encore l'origine de ce mal mystérieux.

Le livre de M.-G. Bousser et H. Massiou se veut essentiellement clinique et pratique : sur 128 pages, ce livre n'en comprend que cinq sur les mécanismes de la migraine, et encore est-ce pour dire qu'aucun des faits, pourtant nombreux, mis en évidence par les moyens modernes d'exploration n'a permis de diminuer l'épaisseur de notre ignorance. L'ouvrage n'en apporte pas moins de multiples informations : on peut même dire qu'il fait la somme de toutes les informations à la fois pertinentes et scientifiquement fondées sur la migraine.

La quasi-totalité du livre est par conséquent consacrée à la description de la migraine, à son identification au sein des différents maux de tête (ou céphalées), à son incidence pratique, au terrain sur lequel elle survient, à son déclenchement, à son traitement ; un lexique fort utile pour les non-médecins conclut l'ouvrage.

Les auteurs développent notamment un point essentiel : il existe deux types de migraines : la migraine simple se résume à un accès de céphalées ; la migraine dite accompagnée est définie par la survenue de troubles visuels (migraine ophtalmique), sensitifs, ou même du langage, voire moteurs. Ces phénomènes accompagnateurs, ou « aura », ont des caractères qui permettent de reconnaître leur nature migraineuse, même quand ils surviennent en l'absence de céphalées. Les troubles visuels sont d'une extraordinaire diversité et donnent lieu à des descriptions dont certains exemples sont agréablement imagés dans le livre. Les troubles sensoriels peuvent, exceptionnellement il est vrai, prendre un aspect fantastique qui a fait parler du syndrome « d'Alice au pays des merveilles ».

Cette double manifestation de la migraine, où certains veulent même voir une dualité nosologique, a fait surgir deux types d'hypothèses qui s'affrontent encore : l'hypothèse vasculaire et l'hypothèse neuronale. L'accès migraineux s'accompagne en effet de phénomènes vasculaires, déjà entraperçus par les vieux auteurs comme Ambroise Paré, au XVI[e] siècle, probablement en raison du caractère pulsatile de la céphalée. Les mesures de débit sanguin ont récemment permis de confirmer et de préciser les désordres hémodynamiques, en mettant notamment en évidence une augmentation du débit sanguin cérébral ; celle-ci est du reste régionale puisqu'elle concerne aussi bien les vaisseaux exocrâniens que les vaisseaux méningés et cérébraux.

En fait, la situation est plus complexe : quand on analyse le débit sanguin par région, on découvre que certaines régions du cerveau sont hyper-irriguées, alors que d'autres sont le siège d'une diminution du débit sanguin, et cela de façon variable dans le temps. On a cru pouvoir attribuer la céphalée à la dilatation des vaisseaux, notamment méningés et exocrâniens, mais il est rapidement apparu que ces désordres hémodynamiques ne sont pas constants au cours des accès céphalalgiques et, surtout, qu'ils peuvent persister alors même que la céphalée a disparu, grâce à un traitement ou spontanément. De multiples hypothèses de remplacement ont été proposées : libération locale de kinines provoquant la douleur, dysfonctionnement des terminaisons nerveuses situées dans les parois artérielles, voire du système nociceptif central lui-même ; aucune n'est encore vérifiée.

Impressionnés par l'aura des migraines accompagnées, certains ont fait de la migraine un phénomène primitivement neuronal : c'est la seconde hypothèse. La progression très caractéristique de la « marche migraineuse » (propagation des troubles visuels du centre vers la périphérie du champ visuel, puis des troubles sensitifs éventuels d'un membre à l'autre, etc.) suggère en effet un phénomène envahissant l'une après l'autre certaines régions contiguës du cortex cérébral. Or la vitesse de propagation de ce phénomène correspond sensiblement à celle de l'onde d'inhibition corticale qui suit une stimulation d'un point du cortex dans certaines conditions expérimentales. Cette onde dite de Leaô (du nom du neuro-physiologiste brésilien qui l'a observée et décrite sur les préparations animales) peut être enregistrée par les moyens

© POUR LA SCIENCE N° 148 FÉVRIER 1990

électrologiques, à la surface du cortex. Dernièrement on a détecté à travers la boîte crânienne un champ magnétique associé à l'onde de Leaô et qui permet d'en suivre la progression ; certains ont même prétendu, tout récemment, avoir enregistré chez l'Homme, au cours d'accès migraineux, un champ magnétique très comparable dans sa forme et sa propagation. La technique mise en jeu est toutefois délicate et l'interprétation en est encore sujette à discussion, mais cette constatation, si elle se vérifiait, serait d'une grande importance pour la compréhension du mécanisme de la migraine ou au moins de l'aura migraineuse.

Comme on le voit, nos connaissances sur la migraine sont fragiles et parcellaires : la théorie de la migraine reste à faire.

Heureusement le traitement, fondé sur une observation clinique minutieuse, remporte un succès incontestable. Le simple fait d'écouter le patient, de lui fournir des explications rassurantes et, éventuellement, un placebo, permet d'alléger notablement les souffrances dans plus de la moitié des cas. Le caractère massif de cet effet placebo semble indiquer une forte participation psychosomatique. Du reste, la plupart des patients ont eux-mêmes remarqué le rôle des stress, des contrariétés, etc. Des conseils sur l'hygiène de vie, sur les horaires nycthéméraux, la relaxation, un éventuel traitement psychotrope, des produits visant à stopper les accès, d'autres visant à les prévenir, tout cela correctement adapté à chaque cas en fonction d'une multitude de paramètres, permet d'obtenir un soulagement appréciable chez 90 pour cent des migraineux. Toutefois ces traitements ne sont efficaces que si le médecin consacre beaucoup de temps au malade, s'il sait mener un interrogatoire prolongé, nécessitant souvent, il faut le reconnaître, une bonne dose de patience et, surtout, beaucoup de savoir-faire et d'expérience. C'est dans cette optique, à la fois lucide, pratique et optimiste que se place le livre de M.-G. Bousser et H. Massiou. Il aidera autant les médecins que les migraineux eux-mêmes.

Jean-Denis DEGOS

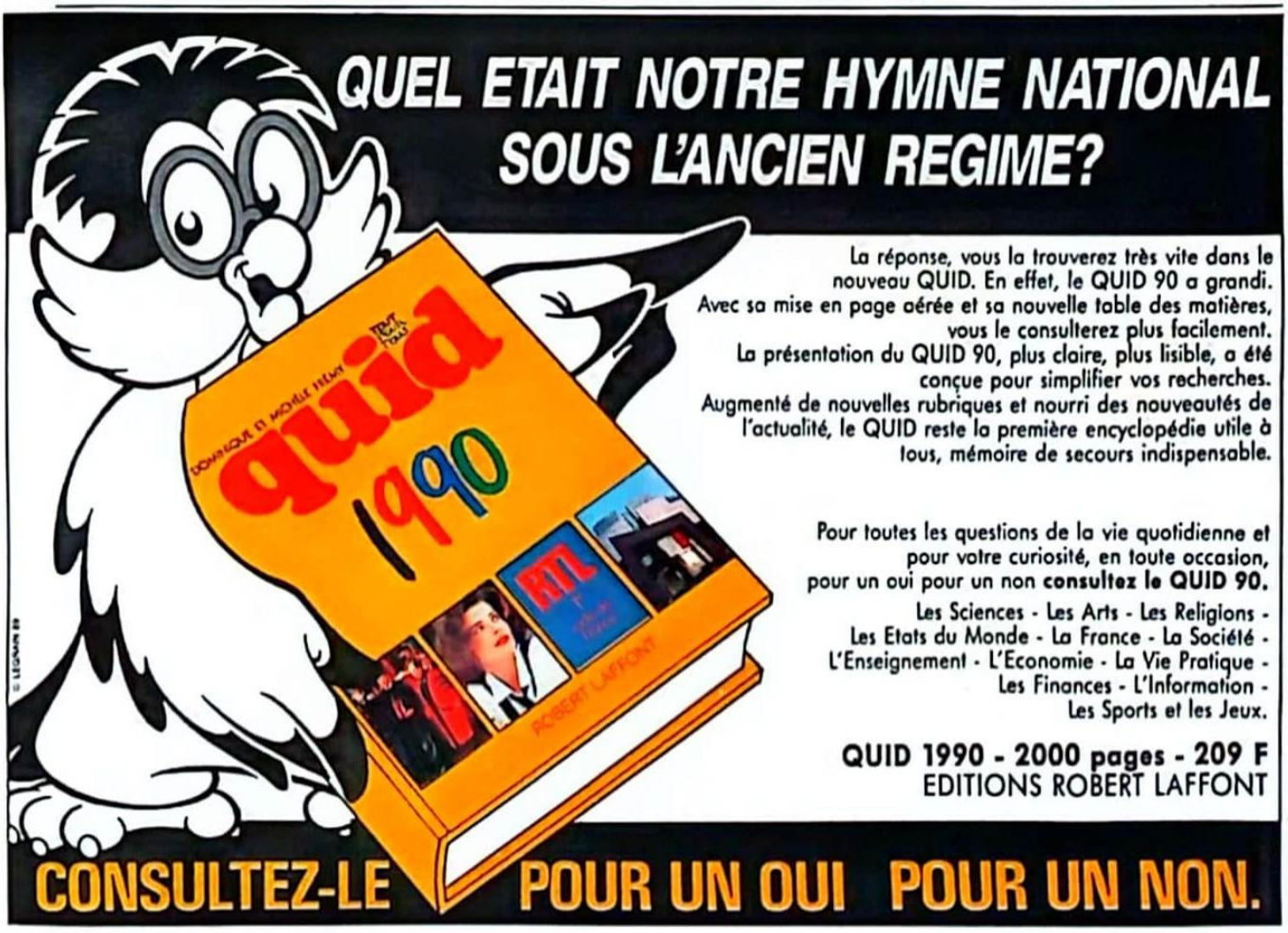
Zoologie

L'ours, seigneur des Pyrénées, François Merlet. Éditions Érables.

Ce livre est une réédition de celui que F. Merlet a publié en 1971, avec une préface de Jean Dorst. À ce premier livre, connu des amis de « Martin », l'auteur a adjoint trois mises à jour, datées de 1980, 1985 et 1988 : les deux premières, brèves, apportent des statistiques sur les populations ursines à l'étranger ; la troisième est un lourd réquisitoire en faveur de notre plus grand fauve national.

L'ouvrage est difficile à caractériser, car il foisonne de contrastes et mélange les genres. Et les propositions passionnées se glissent entre les lignes d'une information objective, voire statistique. Cela tient sans doute à sa double origine, écartelée dans le temps.

L'auteur, photographe professionnel, est un zélateur de la Nature, qu'il



L'ours est habile à manger les insectes.

décrit avec beaucoup de poésie et, parfois même, avec une redondance d'images et de couleurs littéraires.

On admire son courage, qui l'a soutenu pendant des mois et des années de solitude campagnarde, caché dans quelque recoin ou perché sur un mirador battu par le vent, sous la pluie, dans le froid, souvent bredouille, mais jamais découragé.

J'ai fait l'expérience de sa solitude et de son désappointement lorsque, dans les années 1960, je m'avisai d'aller, en compagnie du fils d'un cinéaste disparu, rendre visite aux ours des Pyrénées. Une ourse, habituellement mère tous les deux ans, se rendit plusieurs fois à nos rendez-vous nocturnes, au-dessus d'Etsaut. Ce fut sans doute qu'elle nous catalogua comme « innocents promeneurs », pour parler comme l'auteur, et qu'elle ne prit pas au sérieux nos appareils photographiques et nos flashes à ampoules grésillants (elle n'avait d'ailleurs pas tort !). Elle s'approchait même à quelques mètres de l'abri que nous avions construit et où le vent, la pluie et le sommeil avaient finalement eu raison de notre vigilance, nous empêchant de la voir approcher à portée d'objectif. Une réplique de « l'arroseur arrosé » ! Ses traces dans la neige, bien visibles au petit matin, nous parlaient d'un « fauve » moins méfiant et moins malfaisant qu'on ne le disait alors.

Le livre de F. Merlet peut se lire comme le récit d'une expérience aventureuse en haute montagne et d'une traque couronnée par une collection de belles images – F. Merlet, avec quelques autres, a frayé la voie en ce domaine – ou bien comme l'histoire accélérée de la décrépitude de l'espèce *Ursus arctos* dans son environnement pyrénéen. La première lecture est attachante et optimiste : la deuxième est pessimiste et même calamiteuse. « L'auteur... au bon vieux temps (1960) » nous avait fait participer à ses efforts juvéniles et partager ses joies dans le cadre poétique des Pyrénées. Le voici aujourd'hui amer et découragé !

Les mises à jour de 1980 et de 1985 sont des documents sur les ours des pays de l'Europe de l'Est et de l'Amérique du Nord. En 1988, ça se gâte ! L'auteur fait un pénible procès à la Société, qui n'a pas su garder à la Nature sa pureté et à l'ours ses effectifs d'antan. Il nous plonge aussi dans la curieuse atmosphère de sa philosophie et de sa mystique, qui flotte parfois dans le monde des « naturalistes ». Il y joint aussi des références à la science, bien que, généralement, il ne manque pas une occasion de fustiger les scientifiques et les spécialistes !

Malgré les critiques qu'on peut faire à ses excès de langage, à ses sentiments et ressentiments, on sait gré à l'auteur d'apporter de l'eau au moulin de la protection de la Nature. Il fait connaître les chiffres inquiétants des effectifs des ours en Europe. Il dénonce les méthodes de sauvegarde, inefficaces et inutilement prodigues des deniers publics, les abus sur le plan local et national : tourisme, voirie et circulation, sport et pollution... Il rappelle à son tour et avec quelques autres, que la seule solution viable pour sauver l'ours – méthode efficace comme on l'a expérimenté en d'autres pays – est de lui réserver des havres de paix, parfaitement inviolables, au prix qu'il faudra payer, économiquement et politiquement.

C'est là que gît le problème ! Les meilleures intentions, les projets les mieux fondés en connaissances objectives, se heurtent d'abord et surtout à la mauvaise volonté de certaines catégories d'hommes qui considèrent que les Pyrénées et ce qu'elles renferment leur appartiennent, qu'il y sont les seuls maîtres et que, hors d'eux, personne n'a le droit d'y mettre le nez. Ces hommes, d'ailleurs, se recrutent aussi bien dans la population autochtone que dans les associations, directions et autres ministères, éloignés et centralisateurs.

Tous ces intérêts s'opposent et la concertation honnête qui, seule, pourrait débloquer la situation, n'est pas encore à l'ordre du jour. Il apparaît que tout ce qui touche à l'exploitation de la Nature, la chasse comme la gestion des ressources animales, végétales et physiques, déclenche encore chez nous la cupidité et les passions jalouses.

Pauvre Martin, tu n'es pas sorti de l'auberge !

Bernard RICHARD

RÉFÉRENCES DES ILLUSTRATIONS

Couverture : *The Birds of Paradise and Bower Birds*, de William T. Cooper et Joseph M. Forshaw. P. 8 : J.-P. Coureau, Explorer. P. 11 : Documents PLS. P. 12 : L. de Bonis. P. 13 : P. Favard et coll., Centre de biologie cellulaire, CNRS, Ivry-sur-Seine. P. 15 : Document PLS. P. 16 : H. Fricke. P. 17 : André Moulin, Jacana. P. 18 : Alain Thorel, École nationale supérieure des mines de Paris. Pp. 19 à 26 : Documents PLS. P. 28 : Isabelle Warmesson, IBM France. Pp. 30 et 31 (haut) : Documents PLS. P. 31 (bas) : PLS, P. Horber. P. 32 : P. Horber, d'après Tracor France. P. 34 : Renault. P. 36 : Dane Penland, from Giuseppe Vaiana, CFA, Harvard, Smithsonian Center for Astrophysics. P. 37 : DITE, IPS. P. 39 : Bruce M. Beehler. Pp. 40 et 41 : Patricia J. Wynne. P. 42 (gauche) : David Gillison, Peter Arnold, Inc. P. 42 (droite) : B. Beehler. P. 43 : G. Ziesier, Peter Arnold, Inc. P. 44 : P. Wynne. P. 45 : B. Beehler. Pp. 47 à 49 : Documents PLS. P. 50 : The Royal Society. Pp. 51 à 53 : Documents PLS. P. 54 : Deutsches Museum. P. 57 (haut) : Ronald E. Kalil. Pp. 57 (bas) à 60 : Dana Burns. P. 61 (haut) : R. Kalil. Pp. 61 (bas) et 62 : D. Burns. Pp. 65 à 68 : Hank Iken. Pp. 72 et 73 : International Museum of Photography at George Eastman House, Rochester, N.Y. P. 74 (haut) : Science Museum, London. P. 74 (bas) : International Museum of Photography. P. 75 (haut) : Andrew Christie. P. 75 (bas) : International Museum of Photography. P. 76 : A. Christie. Pp. 77 et 78 (haut et bas droit) : International Museum of Photography. P. 78 (bas gauche) : A. Christie. P. 79 (haut) : International Museum of Photography. P. 79 (bas) : A. Christie. P. 80 : International Museum of Photography. P. 82 : Ian Worpole. P. 83 : Jeremy Bloxham et David Gubbins. Pp. 84 et 85 : I. Worpole. P. 86 : J. Bloocham et D. Gubbins. Pp. 87 et 88 : I. Worpole. P. 91 : Charles T. Peterson, Naval Ocean Systems Center. P. 92 (haut) : A. Christie. Pp. 92 (bas) et 93 à 95 : C. Peterson. P. 97 : Museum Wiesbaden. Pp. 101 à 103 : George V. Kelvin. P. 104 : Luther H. Martin, University of Vermont. P. 106 : Document PLS. P. 107 (haut) : Michelin. Pp. 107 à 110 (haut) : Documents PLS. P. 110 : Michelin. P. 111 : Document PLS. P. 112 : Michael Goodman. Pp. 113 et 114 (haut gauche et bas) : Jearl Walker. P. 114 (haut droit) : M. Goodman. P. 116 : A. Christie. P. 117 : Edward Bell. P. 118 : Russel Ruthen. Pp. 121 et 122 : Éditions Bordas. P. 123 : Éditions Gallimard. P. 126 : Éditions Érables.

Après les Mathématiques de la grande ENCYCLOPÉDIE, en trois tomes, et les grands textes de STEVIN, L'HOSPITAL, VARIGNON, EULER, CAUCHY et CONDORCET, ACL-Editions propose, en souscription :

L'ENCYCLOPÉDIE DES JEUX SOUS LA RÉVOLUTION

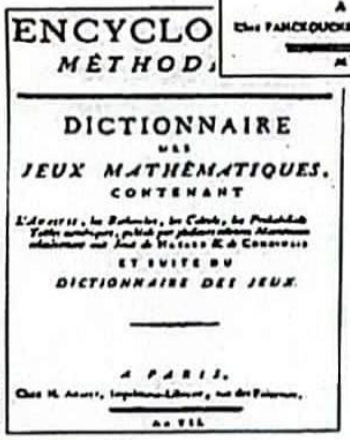
Les trois volumes, JEUX, JEUX MATHEMATIQUES, et JEUX FAMILIERS, reliure toilée, dorée au fer, 708 pages, 16 planches.

EN SOUSCRIPTION (jusqu'au 28/02/90)

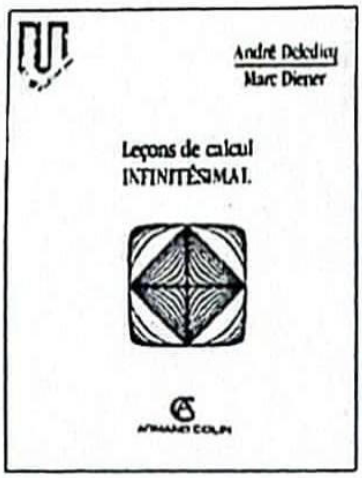
fac-similé de l'édition originale

420 F

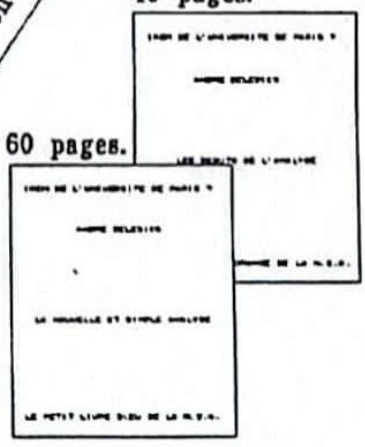
Prix public 580 F.



En coédition avec la librairie ARMAND COLIN (Collection U) :



224 pages, 160 exercices et problèmes corrigés.



Offre spéciale : Les 3 volumes, 200 F.

- Leçons de calcul infinitésimal (Initiation à l'analyse non standard)
- Le petit livre bleu de l'ANS (Comment en parler ? Niveau lycée)
- Le petit livre orange de l'A.N.S. (Comment débuter en analyse...)

Catalogue sur demande
Commande à adresser, en joignant un chèque, à ACL-Editions, BP 111 - 75223 PARIS Cx 05

ANALYSE NON STANDARD

1990 : Enfin des livres pour s'y mettre et comprendre !

AUTEURS ET BIBLIOGRAPHIE

LES OISEAUX DE PARADIS

Bruce BEEHLER est zoologiste au Muséum d'histoire naturelle de l'Institut Smithson.

Bruce BEEHLER et Stephen G. PRUETT-JONES, *Display Dispersion and Diet of Birds of Paradise : A Comparison of Nine Species* in *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 13, 3, pp. 229-238, 1983.
Jared DIAMOND, *Biology of Birds of Paradise and Bowerbirds* in *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 17, pp. 17-27, 1986.
Bruce M. BEEHLER, *Birds of Paradise and Mating System Theory-Predictions and Observations* in *Emu*, vol. 78, n° 2, pp. 78-89, juin 1987.

LA PRÉHISTOIRE DES TROUS NOIRS

Jean EISENSTAEDT est spécialiste de l'histoire de la relativité générale. Chercheur au CNRS, il travaille au laboratoire de physique théorique de l'Institut Henri-Poincaré, à Paris.

Jacques MERLEAU-PONTY, *La Science de l'Univers à l'âge du positivisme*, Vrin, Paris, 1983.
Banesh HOFFMANN, *Histoire d'une grande idée, la relativité*, Bibliothèque *Pour la Science*, 1986.
Albert EINSTEIN, *La relativité*, Petite Bibliothèque Payot, 1956.
Abraham PAIS, *Subtle is the Lord ...*, Oxford University Press, New York, 1982.
Richard PRICE et Kip THORNE, *Les trous noirs ont une nouvelle peau* in *Pour la Science*, n° 128, juin 1988.
Einstein and the History of General Relativity. Proceeding of the 1986, Osgood Hill, Conference. Einstein Studies, vol. 1, John Stachel et Don Howard, Birkhäuser, Boston, 1989.

LA FORMATION DES SYNAPSES DANS LE CERVEAU

Ronald KALIL est le directeur du Centre de neuroscience à l'Université de Madison.

M. STRYKER et W. HARRIS, *Binocular Impulse Blockade Prevents the Formation of Ocular Dominance Columns in Cat Visual Cortex* in *Journal of Neuroscience*, vol. 6, n° 8, pp. 2117-2133, août 1986.
Ronald E. KALIL, Mark W. DUBIN, Grayson SCOTT et Louisa A. STARK, *Elimination of Action Potentials Blocks the Structural Development of Retinogeniculate Synapses* in *Nature*, vol. 323, n° 6084, pp. 156-158, 11 septembre 1986.
Ronald E. KALIL et Mark W. DUBIN, *The Role of Action Potentials in the Morphological Development of Retinogeniculate Connections in the Cat* in *Cellular Thalamic Mechanisms*, sous la direction de Marina Bentivoglio et Roberto Spreafico, Elsevier Science Publishers, 1988.

LA MATIÈRE DIVISÉE : LES PETITS AGRÉGATS

Michael DUNCAN et Dennis ROUVRAY travaillent au département de chimie de l'Université de Géorgie.

Metal Clusters, sous la direction de Martin Moskovitis, John Wiley Sons, Inc., 1986.
Frank TRÄGER et Gisbert F. zu PUTLITZ, *Atomic Cluster : Link Between Atoms, Surfaces and Solids* in *Interdisciplinary Science Reviews*, vol. 11, n° 2, pp. 170-175, 1986.
J.C. PHILLIPS, *Chemical Bonding, Kinetics, and the Approach to Equilibrium Structures of Simple Metallic, Molecular, and Network Microclusters* in *Chemical Reviews*, vol. 86, n° 3, pp. 619-634, juin 1986.
Michael D. MORSE, *Clusters of Transition Metal Atoms* in *Chemical Reviews*, vol. 86, n° 6, pp. 1049-1109, décembre 1986.

LES PREMIÈRES PHOTOGRAPHIES EN COULEUR

Grant ROMER et Jeannette DELAMOIR travaillent au Musée international de la photographie à Rochester.

Josef Maria EDER, *History of Photography*, traduit en anglais par Edward Epstean, Columbia University Press, 1945.
Joseph S. FRIEDMAN, *History of Color Photography*, Focal Press, 1968
E.J. WALL, *History of Three-Color Photography*, Focal Press, 1970
Brian COE, *Colour Photography : The First Hundred Years 1840-1940*, Ash & Grant, 1978.

L'ÉVOLUTION DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE

Jeremy BLOXHAM et David GUBBINS sont professeurs de géophysique, respectivement à l'Université de Harvard et à l'Université de Leeds.

Ronald T. MERRILL et Michael W. MCELHINNY, *The Earth's Magnetic Field : Its History, Origin and Planetary Perspective*, Academic Press, 1983.
Raymond JEANLOZ, *Le noyau de la Terre* in *Pour la Science*, n° 73, novembre 1983.
David GUBBINS, *The Earth's Magnetic Field* in *Contemporary Physics*, vol. 25, n° 3 , pp. 269-290, 1984.
Jeremy BLOXHAM et David GUBBINS, *The Secular Variation of Earth's Magnetic Field* in *Nature*, vol. 317, n° 6040, pp. 777-781, 31 octobre 1985.

LES TÉLÉOPÉRATEURS

William UTTAL est professeur de psychologie à l'Université de l'Arizona.

E.H. SPAIN, R.E. COLE et R.L. PEPPER, *Visual Performance and Fatigue With Stereoscopic Television Displays* in *Proceedings of the Robotics and Remote Handling in Hostile Environments*, National Topical Meeting ANS, Gaitlinburg, pp. 61-67, 23-27 avril 1984.
Jean VERTUT et Philippe COIFFET, *Teleoperation and Robotics, Vols. 3A and 3B*, Prentice Hall, 1986.
W.R. UTTAL, *The Perception of Dotted Forms*, L. Erlbaum Associates, 1987.

LES MYSTÈRES DE MITHRA

David ULANSEY est professeur assistant au département des religions de l'Université de Boston.

Franz CUMONT, *The Mysteries of Mithra*, deuxième édition, traduit en anglais par Thomas J.McCormack, Dover Publications, Inc., 1956.
Roger BECK, *Mithrarism since Franz Cumont* in *Aufstieg und Niedergang der Römischen Welt*, 2e partie, vol. 17.4, sous la direction de Hildegard Temporini et Wolfgang Haase, Walter de Gruyter, 1984.
David ULANSEY, *Mithraic Studies : A Paradigm Shift ?* in *Religious Studies Review*, vol. 13, n° 2, pp. 104-110, avril 1987.
David ULANSEY, *The Origins of The Mithraic Mysteries*, Oxford University Press, 1989.

VISIONS MATHÉMATIQUES

S.L. LONEY, *The Elements of Coordinate Geometry, Part II : Trilinear Coordinates*, MacMillan, London, 1960.
H.M. CUNDY et A.P. ROLLET, *Mathematical Models*, Clarendon Press, Oxford, 1961.
H.S.M COXETER, *Introduction to Geometry*, Wiley, New York, 1969.
Colin TRIP, *Where is the Camera ?* in *The Mathematical Gazette*, n° 71, pp. 8-14, 1987.

L'EXPÉRIENCE DU MOIS

T. MAXWORTHY, *Bubble Formation, Motion and Interaction in a Hele-Shaw Cell* in *Journal of Fluide Mechanics*, vol. 173, pp. 95-114, décembre 1986.
S. TANVEER et P. G. SAFFMAN, *Stability of Bubbles in a Hele-Shaw Cell* in *Physics of Fluids*, vol. 30, n° 9, pp. 2624-2635, septembre 1987.
Jearl WALKER, *Les écoulements fractals* in *Pour la Science*, n° 123, pp. 105-108, janvier 1988.
Anne R. KOPF-SILL et G. M. HOMSY, *Bubble Motion in a Hele-Shaw Cell* in *Physics of Fluids*, vol. 31, n° 1, pp.18-26, janvier 1988.

CRÉATIONS INFORMATIQUES

Roger PENROSE, *The Emperor's New Mind : Concerning Computers, Minds, and The Laws of Physics*, Oxford University Press, 1989.

Imprimé en France - Maury-Imprimeur S.A., Malesherbes - Dépôt légal 5520 - Février 1990 - Commission paritaire n° 59713 du 17-10-77 - Distribution : NMPP
ISSN 0153-4092 - N° d'imprimeur L09/28798 P - Directeur de la publication : Max Brossollet

SEDAO
la sélection

L'AUTOTENTIOMETRE ELECTRONIQUE

Permet très simplement de prendre soi-même sa tension entre deux contrôles médicaux, . Les tensions maximales, minimales et le pouls s'inscrivent automatiquement sur un grand écran à affichage digital. Pratique, son brassard est équipé de velcro et se dégonfle seul.

- Dimension: 14 x 8 x 2 cm.
- Alimentation: 4 piles R6.
- Livré avec un manuel d'utilisation détaillé.

LE "PENSE PAS BETE"

Le VOICE MEMO est une ingénieuse mémoire de poche. Minuscule (8 x 4 cm), il vous permet d'enregistrer d'une simple pression du doigt l'idée au moment où elle jaillit. Que vous soyez au volant de votre voiture, dans la rue, au restaurant ou à la maison, le VOICE MEMO remplace définitivement fiches, pense bêtes et bouts de papiers. Simple à utiliser, il permet d'enregistrer jusqu'à 12 messages successifs à la suite en 30 secondes. • Ecoute par haut parleur incorporé. • Touche de repérage du message. • Livré avec pile.

NOS ENGAGEMENTS

LES PRIX LES PLUS BAS DE LA VENTE PAR CORRESPONDANCE.

DES PRODUITS GARANTIS 1 AN MINIMUM.

VOUS ETES SATISFAITS OU REMBOURSÉ.

LIVRAISON GRATUITE SOUS 15 JOURS.

UN CRÉDIT GRATUIT 3 MOIS.

Pour commander par téléphone, avec votre Carte Bancaire (C B), appelez le 16 (1) 47 30 44 55 + de 9 à 18h du Lundi au Vendredi.

BON DE COMMANDE

A retourner à : CENTRALE D'ACHATS SEDAO
37-39 rue des Grands Champs - 75980 PARIS CEDEX 20 - VEPEX 5000

☐ **OUI** Je désire commander les articles suivants et recevoir gratuitement le catalogue 44 pages couleur **L'INDEX**

Qté	DESIGNATION	REFERENCE	PRIX UNIT.	MONTANT
	AUTOTENTIOMÉTRE	Code 62C. 0709	595 F	
	VOICE MEMO	Code 62C. 1647	295 F	
		Participation aux frais de colisage		+ 25 F
		TOTAL TTC		

NOM: _____
PRENOM: _____
ADRESSE: _____
_____
CODE POSTAL |_|_|_|_|_|
VILLE: _____

☐ **NON** Je ne commande rien aujourd'hui mais je désire recevoir le catalogue 44 pages couleur L'INDEX. Pour cela je joins à ce bon de commande un chèque de 25 F remboursable dés le premier achat.

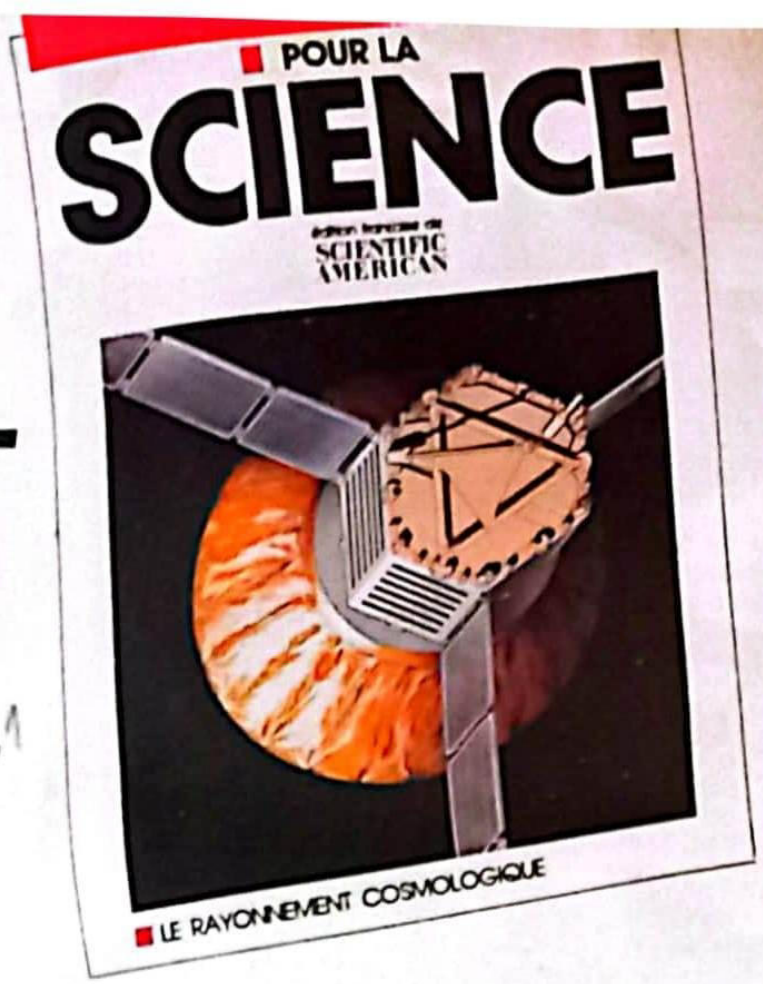
JE REGLE MA COMMANDE PAR:
☐ CHEQUE BANCAIRE OU POSTAL A L'ORDRE DE SEDAO
☐ CARTE BLEUE N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
DATE DE VALIDITE: _____

☐ CREDIT GRATUIT: Un paiement fractionné gratuit de 3 mois est offert à nos lecteurs pour toute commande. Fractionnez le montant de votre achat en trois chèques et joignez-le à votre commande. Ils seront débités chacun à un mois d'intervalle.

POUR LA SCIENCE... UNE SCIENCE D'AVANCE

Ne manquez pas le prochain numéro

3861



MARS N° 149

- **L' esprit est-il un programme d'ordinateur ?,**
  par John Searle
- **Une machine peut-elle penser ?,**
  par Paul Churchland et Patricia Churchland
- **Les ADN et ARN antisens,**
  par Harold Weintraub
- **Le cycle des glaciations,**
  par Wallace Broecker et George Denton
- **L'asymétrie de l'Univers,**
  par Roger Hegstrom et Dilip Kondepudi
- **Les microplasmas,**
  par John Bollinger et David Wineland
- **Un satellite pour explorer le passé et le futur de l'Univers,**
  par Samuel Gulkis, Philip Lubin, Stephan Meyer et Robert Silverberg

Nez aérodynamique, profilé pour 300 km/h en vitesse de croisière

Notre ponctualité va en prendre un coup. Le TGV Atlantique est en avance sur son temps.

SNCF
C'EST POSSIBLE !

MICROSCOPE CONFOCAL À BALAYAGE LASER

Equipé de la nouvelle optique Zeiss ICS, le microscope confocal à balayage laser LSM est destiné aux applications les plus variées en biologie, science des matériaux et micro-électronique

ZEISS LSM

LASER-SCAN-MIKROSKOPE

Avantages du ZEISS LSM

- Système double-laser indéréglable et intégré
- Commutation aisée entre la microscopie conventionnelle et la microscopie par balayage laser
- Pouvoir séparateur : 0,2 micromètre
- Détection confocale Z : 0,1 micromètre
- Coupes optiques parfaites par intégration complète des différents modules du système
- Détecteur confocal optimisé pour épifluorescence
- Détecteur optimisé pour lumière transmise
- Epipolarisation ANTIFLEX
- Epifluorescence UV 350 nanomètre
- OBIC
- Infrarouge 1152 nanomètre

Pour plus d'informations :

Carl Zeiss Sàrl
Département de Microscopie
60, route de Sartrouville
78230 Le Pecq
Tél. : 34 80 20 44

ZEISS West Germany

SYSTÈMES MICROSCOPIQUES DE CARL ZEISS